

TUGAS AKHIR - TE 141599

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI CHARGER BATERAI LITHIUM-ION
MENGUNAKAN CONSTANT CURRENT PULSE CHARGING 500 WATT
UNTUK SEPEDA MOTOR LISTRIK**

**Zatriananda Dibya Pradhana
NRP 07111645000065**

**Dosen Pembimbing
Danar Fahmi, S.T., M.T.
Heri Suryatmojo, S.T., M.T., Ph.d.**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018**



TUGAS AKHIR - TE 141599

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI *CHARGER* BATERAI
LITHIUM-ION MENGGUNAKAN *CONSTANT CURRENT*
PULSE CHARGING 500 WATT UNTUK SEPEDA MOTOR
LISTRIK**

Zatriananda Dibya Pradhana
NRP 07111645000065

Dosen Pembimbing
Danar Fahmi, S.T., M.T.
Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.

DEPARTEMEN S1 TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



FINAL PROJECT - TE 141599

**DESIGN AND IMPLEMENTATION BATTERY CHARGER
LITHIUM-ION USING CONSTANT CURRENT PULSE
CHARGING 500 WATT FOR ELECTRIC MOTOR CYCLE**

Zatriananda Dibya Pradhana
NRP 07111645000065

Advisor
Danar Fahmi, S.T., M.T.
Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

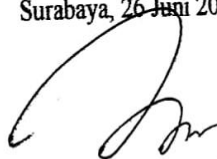
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul "**Desain dan Implementasi Charger Baterai Lithium-Ion menggunakan Constant Current Pulse Charging 500 Watt Untuk Sepeda Motor Listrik**" adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 26 Juni 2018



Zatriananda Dibya Pradhana
NRP 07111645000065

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI CHARGER BATERAI
LITHIUM-ION MENGGUNAKAN CONSTANT CURRENT PULSE
CHARGING 500 WATT UNTUK SEPEDA MOTOR LISTRIK**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

**Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I



Daniar Fahmi, S.T., M.T.
NIP. 198909252014041002

Dosen Pembimbing II



Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 198006032006041003



-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

DESAIN DAN IMPLEMENTASI CHARGER BATERAI LITHIUM-ION MENGGUNAKAN CONSTANT CURRENT PULSE CHARGING 500 WATT UNTUK SEPEDA MOTOR LISTRIK

Nama : Zatriananda Dibya Pradhana
Pembimbing 1 : Daniar Fahmi, S.T., M.T.
Pembimbing 2 : Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D

ABSTRAK

Transportasi berbasis tenaga listrik menggunakan baterai sebagai sumber energi yang dapat diisi ulang (*rechargeable*), mengurangi dampak buruk transportasi masal bertenaga bahan bakar minyak. *Rechargeable* baterai, memiliki berbagai kendala salah satunya pada sisi pengisian muatan (*charging*). *Charging* baterai menjadi salah satu poin yang tidak bisa diabaikan, dimana *charging* yang lambat secara tidak langsung berefek pada usia dari baterai (*lifespan*) tersebut. Berbagai metode *charging* baterai diteliti, untuk mendapatkan hasil yang efektif dan efisien dengan tujuan memperpanjang *lifespan* dari baterai. Oleh karena itu, pada penelitian ini diaplikasikan *charger* dengan metode *charging* arus konstan dan pulsa, yang menurut penelitian sebelumnya memiliki kemampuan untuk mendapatkan performa *charging* yang optimal. *Charger* baterai menggunakan *buck* konverter dengan kontrol keluaran arus konstan dan pulsa dengan frekuensi 1 KHz dan 100 Hz diterapkan serta disesuaikan dengan *plant*, yaitu baterai Li-ion. *Buck* konverter menghasilkan efisiensi rata-rata 56% pada *full load* 600 Watt, dan *charging* pulsa frekuensi 1 kHz menghasilkan waktu *charging* tiga kali lebih cepat dibandingkan dengan pulsa frekuensi 100 Hz.

Kata Kunci : Baterai, Li-ion, *Charger*, *Pulse Charging*

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

**DESIGN AND IMPLEMENTATION BATTERY CHARGER
LITHIUM-ION USING CONSTANT CURRENT PULSE
CHARGING 500 WATT FOR ELECTRIC MOTORCYCLE**

Name : Zatriananda Dibya Pradhana

Advisor 1 : Daniar Fahmi, S.T., M.T.

Advisor 2 : Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D

ABSTRACT

Power-based transportation uses batteries as a rechargeable energy source, reducing the adverse impact of mass-fueled mass transportation. Rechargeable battery, has various constraints one of them on the charging side (charging). Battery charging is one of the most indispensable points, where sluggish charging indirectly affects the age of the battery (lifespan). Various battery charging methods are examined, to obtain effective and efficient results with the aim of extending the lifespan of the battery. Therefore, in this study applied charger with constant current charging method and pulse, which according to previous research have ability to get optimal charging performance. Battery charger using konverter buck with constant current output control and pulse with frequency 1 KHz and 100 Hz applied and adapted to plant, that is Li-ion battery. Buck konverter produces 56% average efficiency at 600 Watt full load, and 1 kHz frequency pulse charging generates three times faster charging times than a 100 Hz frequency pulse.

Keywords : Battery, Li-ion, Charger, Pulse Charging

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang selalu memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik. Shalawat serta salam semoga selalu dilimpahkan kepada Rasulullah Muhammad SAW, keluarga, sahabat, dan umat muslim yang senantiasa meneladani beliau.

Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan guna menyelesaikan pendidikan Strata-1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan judul:

Desain dan Implementasi *Charger* Baterai *Lithium-ion* Menggunakan Constant Current Pulse Charging 500 Watt Untuk Sepeda Motor Listrik

Dalam Tugas Akhir ini dirancang *charger* baterai Li-ion dengan keluaran terkontrol arus konstan dan sinyal *charging* pulsa dengan spesifikasi sesuai baterai yang digunakan oleh sepeda motor listrik. Penulis mengucapkan terima kasih kepada Ibu dan Bapak penulis yang memberikan berbagai bentuk doa serta dukungan tulus tiada henti, Bapak Daniar Fahmi, S.T., M.T. dan Bapak Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D selaku dosen pembimbing, atas segala bimbingan ilmu, moral, dan spiritual dari awal hingga terselesaikannya Tugas Akhir ini. Penulis juga mengucapkan banyak terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu baik secara langsung maupun tidak langsung dalam proses penyelesaian Tugas Akhir ini, khususnya teman teman lintas jalur 2016, member dan asisten lab Konversi Energi B-101 Departemen Teknik Elektro ITS Surabaya.

Penulis menyadari dan memohon maaf atas segala kekurangan pada Tugas Akhir ini. Akhir kata, semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat dalam pengembangan keilmuan di kemudian hari.

Surabaya, 26 Juni 2018

Penulis

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

DAFTAR ISI

	HALAMAN
HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN JUDUL.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	v
LEMBAR PENGESAHAN.....	vii
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	xi
KATA PENGANTAR.....	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
 BAB I PENDAHULUAN	 1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan	2
1.5 Metodologi Penelitian	3
1.6 Sistematika Laporan.....	3
1.7 Relevansi	4
 BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN TEORI PENUNJANG ..	 7
2.1 Penelitian <i>Charging</i> Li-ion Terdahulu	7
2.2 Penelitian <i>Buck</i> Konverter dengan Keluaran Terkontrol.....	8
2.3 Teori Penunjang	9
2.3.1 <i>Buck</i> Konverter.....	9
2.3.2 Komponen Elektronika Daya Pendukung	12
2.3.3 Karakteristik Li-ion	16
2.3.4 <i>Charging</i> Mekanisme	19
 BAB III PERANCANGAN DAN SIMULASI <i>BUCK</i> KONVERTER KONTROL KELUARAN CCPC	 23
3.1 Strategi Kontrol <i>Buck</i> CCPC.....	23
3.2 Perencanaan Perancangan	24
3.3 Desain dan Perhitungan Pemilihan Komponen	25

3.3.1	<i>Buck</i> Konverter	25
3.3.2	Pemilihan MOSFET dan Driver MOSFET	30
3.3.3	Pulsa Arus dan Tegangan.....	33
3.3.4	Perancangan Kontrol <i>Charger</i>	33
3.4	Simulasi Hasil Desain	39
3.4.1	Simulasi <i>Buck</i> Konverter	39
3.4.2	Simulasi Rangkaian Pulse Current/Voltage	41
3.4.3	Simulasi <i>Constant Current</i> (CC) <i>Charging</i>	42
3.4.4	Simulasi <i>Pulse Charging</i> (PC).....	44
3.4.5	Simulasi <i>Constant Current Pulse Charging</i> (CCPC).....	45
3.5	Pengujian Implementasi Hasil Desain	46
3.5.1	Pengujian <i>Buck</i> Konverter	47
3.5.2	Pengujian Rangkaian Pulse	49
3.5.3	Pengujian Sensor Tegangan	51
3.5.4	Pengujian Sensor Arus	52
3.5.5	Pengujian Loop Tertutup-Kontrol Arus Konstan	53
	BAB IV IMPLEMENTASI DAN ANALISIS DATA.....	55
4.1	Prosedur Pengujian	55
4.2	Analisis Hasil Pengujian	55
4.2.1	Analisis Pengujian Performa Konverter	55
4.2.2	Analisis Pengujian <i>Charging</i> CCPC	58
	BAB V PENUTUP	63
	DAFTAR PUSTAKA	65
	DAFTAR RIWAYAT HIDUP	67

DAFTAR GAMBAR

HALAMAN

Gambar 2.1	Rangkaian dasar <i>buck</i> konverter.....	9
Gambar 2.2	<i>Waveform buck</i> konverter.....	12
Gambar 2.3	Simbol dan grafik karakteristik BJT.....	13
Gambar 2.4	Simbol MOSFET.....	14
Gambar 2.5	Karakteristik MOSFET	14
Gambar 2.6	Simbol IGBT	15
Gambar 2.7	Karakteristik <i>forward</i> dan transfer IGBT	15
Gambar 2.8	Simbol dioda	16
Gambar 2.9	Karakteristik diode	16
Gambar 2.10	Bagian baterai dan perpindahan ion baterai Li-ion.....	17
Gambar 2.11	Kurva <i>charge discharge</i> baterai	17
Gambar 2.12	Kurva <i>discharge</i> sel baterai	18
Gambar 2.13	Skema CC <i>charger</i>	20
Gambar 2.14	Diagram blok <i>charger</i> mode CCCV.....	20
Gambar 3.1	<i>Charge profile</i> IC LTC4052 [13]	23
Gambar 3.2	Diagram blok strategi CCPC	24
Gambar 3.3	Dioda MUR 1560	29
Gambar 3.4	Desain <i>Buck</i> konverter.....	29
Gambar 3.5	Contoh <i>pulse</i> generator NE 555	30
Gambar 3.6	Sinyal keluaran pin digital mikrokontroler.....	31
Gambar 3.7	MOSFET dan simbol IRFP 460	32
Gambar 3.8	Skema pengendalian MOSFET	32
Gambar 3.9	Konfigurasi Pin IC TLP 250	32
Gambar 3.10	Sistem loop tertutup	33
Gambar 3.11	Perencanaan sensor tegangan	34
Gambar 3.12	ACS 712	36
Gambar 3.13	Blok diagram fungsional ACS 712.....	36
Gambar 3.14	Flow Chart CCPC.....	37
Gambar 3.15	Komponen penyusun sistem <i>charger</i> CCPC	38
Gambar 3.16	Diagram blok simulasi <i>buck</i> konverter.....	39
Gambar 3.17	Hasil <i>plotting</i> simulasi <i>buck</i> konverter	40
Gambar 3.18	Data keluaran tegangan simulasi <i>buck</i> konverter	40
Gambar 3.19	Data keluaran arus simulasi <i>buck</i> konverter	40
Gambar 3.20	Diagram blok simulasi penghasil sinyal pulsa	41
Gambar 3.21	Hasil <i>plotting</i> keluaran simulasi sinyal pulsa	41

Gambar 3.22 Data simulasi tegangan pulsa	42
Gambar 3.23 Data simulasi arus pulsa	42
Gambar 3.24 Diagram blok simulasi CC <i>charger</i>	43
Gambar 3.25 Hasil simulasi CC <i>charging</i>	43
Gambar 3.26 Diagram blok simulasi PC <i>charger</i>	44
Gambar 3.27 Hasil simulasi PC	44
Gambar 3.28 Diagram blok simulasi CCPC	45
Gambar 3.29 <i>Plotting</i> simulasi perubahan mode <i>charging</i>	46
Gambar 3.30 Hasil perancangan <i>charger</i>	47
Gambar 3.31 Gelombang gate dengan frekuensi 100 Hz	50
Gambar 3.32 Gelombang keluaran rangkaian pulsa $f=100$ Hz	50
Gambar 3.33 Gelombang keluaran rangkaian pulsa $f=1$ kHz	51
Gambar 3.34 Hasil kontrol terhadap setpoint 0,5 Ampere	54
Gambar 3.35 Hasil kontrol terhadap setpoint 1 Ampere	54
Gambar 4.1 Perbandingan tegangan input terhitung dengan terukur ...	55
Gambar 4.2 Perbandingan grafik daya input terhadap daya output	56
Gambar 4.3 Tren efisiensi terhadap daya beban	56
Gambar 4.4 Pembacaan sensor arus	57
Gambar 4.5 Pembacaan sensor tegangan	58
Gambar 4.6 Karakteristik <i>charging</i> baterai Panasonic NCR18650B ...	59
Gambar 4.7 Kurva karakteristik <i>charging</i> CCPC dengan $f=100$ Hz	59
Gambar 4.8 Kurva karakteristik <i>charging</i> CCPC dengan $f=1$ kHz	60
Gambar 4.9 Pemodelan impedansi baterai	60

DAFTAR TABEL

	HALAMAN
Tabel 3.1 Spesifikasi <i>Charger</i>	25
Tabel 3.2 Data <i>buck</i> konverter dengan <i>duty cylce</i> =10%	48
Tabel 3.3 Data <i>buck</i> konverter dengan <i>duty cylce</i> =20%	48
Tabel 3.4 Data <i>buck</i> konverter dengan <i>duty cylce</i> =30%	48
Tabel 3.5 Data <i>buck</i> konverter dengan <i>duty cylce</i> =38%	48
Tabel 3.6 Data pengujian performa <i>buck</i> konverter	49
Tabel 3.7 Data gelombang pulsa, $f=100$ Hz, <i>duty cycle</i> 50%	50
Tabel 3.8 Data gelombang pulsa, frekuensi 1 kHz, <i>duty cycle</i> 50%	51
Tabel 3.9 Data pembacaan sensor tegangan.....	52
Tabel 3.10 Data pembacaan sensor arus	53

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi merupakan komponen yang penting untuk menunjang kehidupan manusia, yang mana banyak dimanfaatkan pada berbagai aspek, seperti industri, residensial, hingga transportasi umum maupun pribadi. Jenis energi yang digunakan tersebut, merupakan energi konvensional atau energi tak terbarukan, seperti batubara dan minyak bumi. Sektor transportasi merupakan sektor yang paling besar mengonsumsi energi berupa bahan bakar minyak (BBM) dibanding sektor lainnya [1], dikarenakan jumlah unit yang sangat banyak. Menurut Data Badan Pusat Statistik, jumlah kendaraan bermotor di Indonesia pada 2015 mencapai 121,39 juta unit. Rincian, sepeda motor dengan jumlah 98,88 juta unit (81,5 %). Diikuti mobil penumpang dengan jumlah 13,48 juta unit (11,11 %), kemudian mobil barang 6,6 juta unit (5,45 %), serta mobil bis dengan jumlah 2,4 juta unit (1,99 %) dari total kendaraan. Tentu saja tingginya konsumsi BBM dengan penggunaan kendaraan bermotor dengan bahan bakar minyak khususnya sepeda motor (unit kendaraan dengan jumlah tertinggi) dapat menyebabkan berbagai dampak negatif, seperti polusi udara dan semakin berkurangnya persediaan bahan bakar dunia. Untuk menyelesaikan dampak negatif tersebut, diperlukan peralihan energi bahan bakar untuk transportasi, seperti dari BBM ke energi listrik. Transportasi dengan energi listrik memiliki banyak permasalahan, salah satunya dalam media penyimpanan energinya, yaitu baterai [2].

Baterai yang memiliki kemampuan pengisian daya kembali (*rechargeable*) sangat penting bagi *electric vehicle* (EV), baik itu sebagai sumber energi utama (primer) maupun cadangan (sekunder). Terdapat beragam jenis baterai *rechargeable* seperti *lead acid gel*, Nikel Cadmium (NiCd), Nickel Metal Hydride, dan *Lithium-Ion* (Li-ion). Li-ion sangat banyak diaplikasikan pada barang elektronik, tak terkecuali untuk transportasi seperti *Electric Vehicle* (EV) atau *Hybrid Electric Vehicle* (HEV), karena kebutuhan daya EV dan HEV yang besar [3]. Selain itu, Li-ion banyak digunakan karena memiliki kepadatan daya tinggi, siklus hidup yang panjang, efisiensi yang tinggi, stabil, dan aman

[4]. Untuk kapasitas yang besar, baterai Li-ion dikemas dalam satu *pack* yang berisi sel sel baterai disusun secara seri, paralel, atau *shunt-series*.

Pengisian ulang muatan (*charging*) baterai menjadi salah satu poin yang penting, cepat atau lambat waktu yang dibutuhkan untuk *charging* baterai secara tidak langsung berefek pada usia dari baterai tersebut [5]. Berbagai metode pengisian muatan telah digunakan dengan tujuan mendapatkan waktu pengisian baterai yang cepat agar didapat usia baterai yang panjang [5].

Penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan desain *charger* pada baterai Li-ion yang maksimal, membandingkan parameter hasil desain dengan literatur yang digunakan, dan menarik kesimpulan mengenai desain yang dirancang.

1.2 Permasalahan

Permasalahan pada Tugas Akhir adalah bagaimana merancang desain untuk *charger* baterai Li-ion yang dapat digunakan untuk kendaraan berbasis tenaga listrik dengan kontrol sinyal keluaran berupa konstan arus dan pulsa arus/tegangan, menentukan parameter frekuensi pulsa yang digunakan untuk mengoptimalkan *charging* baterai dan merancang *charger* yang aman bagi baterai.

1.3 Batasan Masalah

Baterai yang digunakan untuk sepeda motor listrik adalah jenis Li-ion, dengan merk Panasonic tipe NCR18650B dengan tegangan nominal-ratingnya 3.6-4.2 Volt, dan kapasitas 3350 mAh. *Charger* menggunakan pengaturan arus *charge Constant Current Pulse Charging* (CCPC), spesifikasi *charger* untuk baterai Li-ion ditentukan tegangan rating 120 Volt, dengan daya maksimum 600 Watt dan arus maksimum 5 Ampere. Mengabaikan ketelitian dan kompleksitas perancangan penyearah yang digunakan sebagai sumber dc dari *charger*.

1.4 Tujuan

Mendesain *charger* baterai Li-ion dengan daya 500 Watt, dan memiliki tegangan rating 120 Volt dan 5 Ampere, sesuai dengan spesifikasi baterai yang digunakan untuk motor listrik yaitu baterai Li-ion berkapasitas 34 Ah tegangan nominal 86.4 Volt. Mendesain *charger* dengan kontrol keluaran CCPC, yang diharapkan dapat meningkatkan efisiensi dan efektifitas waktu yang dibutuhkan dalam *charging* baterai.

Meningkatkan jangka waktu hidup (*lifespan*) baterai dan dapat diaplikasikan untuk pengisian baterai perangkat elektronik secara nyata/*real* untuk kendaraan berbasis energi listrik atau *Electric Vihecle* (EV)

1.5 Metodologi Penelitian

Mempelajari dasar teori tentang karakteristik, prinsip kerja pengisian dan pelepasan muatan baterai Li-ion, mempelajari karakteristik komponen elektronika yang digunakan untuk *charger* baterai Li-ion, teori *charging* dengan metode CCPC, dan pramater penting dalam mendesain *charger* baterai Li-ion. Setelah itu, merencanakan desain *charger* baterai dengan metode CCPC berdasarkan literatur, menyesuaikan dengan spesifikasi baterai Li-ion dan mensimulasikan perancangan menggunakan *software* PSIM/SIMULINK untuk melihat respon dari baterai terhadap *charger*, dan melakukan koreksi bila diperlukan agar didapat desain *charger* yang maksimal sebelum pengimplementasian. Kemudian, merealisasikan hasil desain dan simulasi dalam bentuk perangkat nyata, melihat hasil kerja *charger* terhadap baterai Li-ion, mengambil data sesuai parameter yang ditentukan, data yang diambil disajikan dalam bentuk tabel, grafik, atau gambar. Membandingkan data yang didapat tersebut dengan literatur ataupun jurnal yang menjadi tinjauan pustaka, melakukan analisis untuk mendapat koreksi dan menarik kesimpulan mengenai desain *charger* yang diterapkan pada baterai Li-ion.

1.6 Sistematika Laporan

Pembahasan tugas akhir ini dibagi menjadi lima bab dengan sistematika sebagai berikut:

Bab I Pendahuluan

Membahas mengenai latar belakang mengapa penelitian ini dilakukan, tujuan dari dilakukannya penelitian, permasalahan yang dihadapi dalam realisasi penelitian, dan batasan masalahnya. Memaparkan metodologi yang dilakukan peneliti, sistematika penyusunan laporan dan relevansi penelitian terhadap topik sejenis.

Bab II Teori Penunjang Komponen Elektronika Daya untuk *Buck* Konverter dan Tinjauan Pustaka *Charging* Baterai Li-ion

Membahas teori dasar mengenai rangkaian *buck* konverter beserta komponen penyusunnya. Karakteristik baterai Li-ion, hal yang perlu diperhatikan dalam *charging* baterai Li-ion, dan penelitian terdahulu mengenai *buck* konverter, *charging* Li-ion, *constant current* (CC) dan *pulse charging* (PC).

Bab III Pemilihan komponen, Perancangan, dan Simulasi *Charger Constant Current Pulse Charging* (CCPC)

Memaparkan mengenai perhitungan pemilihan komponen untuk *buck* konverter, perancangan *buck* konverter, simulasi hasil perancangan, pemilihan sensor untuk kontrol dan *flow chart* untuk *programming* mikrokontroler sinyal keluaran *buck* konverter.

Bab IV Pengujian dan Analisis *Charger CCPC*

Membahas mengenai performa realisasi desain *buck* konverter, efisiensi, *total harmonic distortion* (THD), performa *charging* baterai dibandingkan dengan *charger* konvensional, dan analisis data hasil pengujian desain *buck* konverter.

Bab V Penutup

Memuat mengenai kesimpulan akhir dari penelitian, kritik dan saran untuk penelitian selanjutnya dengan topik sejenis.

1.7 Relevansi

a. Institusi

Menunjang penelitian dari Mobil Listrik Nasional (MOLINA) ITS tentang baterai dan alat pengisian baterai.

b. Bidang Ilmu Pengetahuan

Data hasil penelitian dapat digunakan untuk riset lebih lanjut dalam realisasi kendaraan berbasis tenaga listrik pada bagian *energy storage* di Indonesia dalam rangka efisiensi energi dan menunjang kemungkinan produksi *charger* dengan metode arus pulsa.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN TEORI PENUNJANG

2.1 Penelitian *Charging* Li-ion Terdahulu

Baterai merupakan komponen yang penting bagi peralatan elektronik, tak terkecuali untuk transportasi berbasis energi listrik atau *Electrical Vihecle* (EV). Baterai itu sendiri memiliki berbagai permasalahan salah satunya *charging*. Banyak peneliti mengemukakan metode *charging* untuk baterai seperti Lithium Acid, LiFePO_4 , Li-ion, dan lain lain. Metode yang paling dasar digunakan atau untuk charger konvensional adalah *Constant Current Trickle Charge* (CCTC) dimana prinsip kerjanya sangat sederhana, yaitu *charging* baterai menggunakan arus konstan yang kecil hingga kapasitas dari baterai terisi penuh [6]. Menurut referensi tersebut, metode CCTC yang memiliki desain sederhana dan harga yang murah, memiliki kerugian dimana waktu *charging* yang sangat lama atau *overnight charges*. Selain tidak efisien, metode CCTC ini secara tidak langsung memengaruhi umur dari baterai. Untuk menyelesaikan masalah CCTC yang menggunakan arus kecil, dikemukakan metode *charging* menggunakan arus yang lebih besar. Metode yang sering digunakan untuk charger komersial adalah *Constant Current Constant Voltage* (CCCV) [5]. Metode CCCV menunjukkan kinerja yang baik pada kondisi *charging* dan penghentian *charging* pada saat kondisi baterai sudah penuh [7]. Menurut Niroshana dkk, CCCV menerapkan arus konstan sampai baterai mencapai tegangan yang ditentukan, kemudian tegangan ditahan bernilai konstan sampai arus perlahan turun ke nilai yang lebih kecil. Proses tersebut menimbulkan reaksi kimia yang menyebabkan konsentrasi ion terpolarisasi pada permukaan elektrode, pemanasan baterai pada dendrit dan buruknya formasi kristalisasi elektroda [7]. Metode lain dikembangkan untuk mengatasi kelemahan dari CCCV, seperti *Pulse Charging* (PC). PC merupakan metode *charging* baterai dengan waktu cepat yang banyak dikembangkan untuk baterai Li-ion [8]. Metode PC menerapkan arus konstan kontinyu berupa pulsa dengan lebar pulsa sedemikian rupa dengan frekuensi pulsa tertentu, hingga baterai terisi penuh. Menurut Majid dkk, *charging* menggunakan PC dapat meningkatkan efektifitas pengisian muatan Li-ion, karena dapat mengurangi waktu *charging* dan menurunkan rugi kapasitas dari sel baterai. Banyak pengembangan lain dari metode CV dan PC, seperti *hybrid* arus PC dengan arus sinusoidal [5], *charging* dengan mempertimbangkan *State of Charge* (SOC) dan

State of Health (SOH) dari baterai [9], *charging* menggunakan metode kontrol yang kompleks seperti *Fuzzy Controlled Battery Charging* (FCBC), *Neural Network* (NN), *Phase Locked Technique* (PLT), *Ant-Colony Systems*, dan *Genetic Algorithm* (GA) [7]. Semua metode tersebut bertujuan untuk meningkatkan kontrol arus yang lebih halus dan *charging rate*.

2.2 Penelitian *Buck Konverter* dengan Keluaran Terkontrol

Sistem dari kendaraan berbasis tenaga listrik atau *Electric Vehicle* (EV) terdiri dari tiga bagian inti; yaitu bagian penyimpanan energy, bagian kontrol dan bagian mekanik [10]. Bagian penyimpanan energy disini lebih tepatnya baterai untuk EV harus mencukupi kebutuhan tenaga yang diperlukan motor listrik. Sistem pengisian baterai atau bagian kontrol yang baik diperlukan untuk menghasilkan sistem baterai yang baik pula. Sistem pengisian baterai adalah kunci utama dalam EV yang berperan sebagai jembatan untuk penyimpanan tegangan tinggi baterai [10]. Jika sistem *charging* sangat baik maka dapat menghasilkan tenaga maksimal untuk mensuplai kebutuhan elektrik menuju baterai. Menurut Ibrahim dkk, performa dari baterai tidak bergantung pada baterai itu sendiri, melainkan juga bergantung pada bagaimana baterai itu digunakan dan di-charge. Metode umum yang digunakan untuk *charging* EV terdiri dari penyearah AC DC diikuti dengan konverter DC DC untuk menghasilkan tegangan DC yang dibutuhkan oleh baterai. Ibrahim menggunakan metode *phase sifted full bridge* dan LLC dengan *hybrid resonant* dan konverter PWM dikombinasikan dengan *resonant* LLC setengah jembatan dan topologi *phase shifted* jembatan penuh yang diharapkan menghasilkan efisiensi yang tinggi dan *true soft switching*, yang mana sangat penting untuk aplikasi *charger* baterai EV tegangan tinggi. *Full bridge* tersebut terdiri dari empat buah MOSFET dengan efisiensi 85% dibandingkan dengan *half bridge* [10].

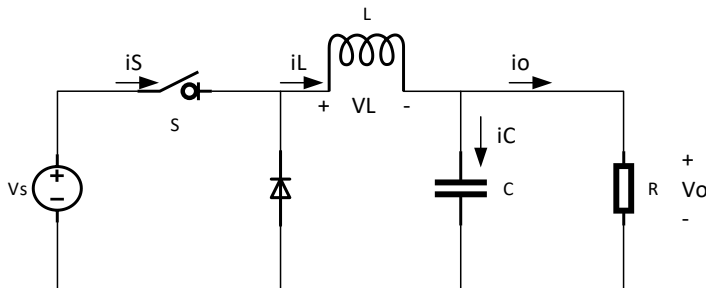
Selain dari komponen elektronika daya yang memengaruhi performa *charger*, kontroler dari konverter DC DC juga berkontribusi. Kontroler tersebut dapat berupa rangkaian elektronik maupun algoritma pemrograman yang dapat merubah PWM dari gelombang dengan mengatur waktu nyala-mati untuk mendapatkan nilai keluaran yang diinginkan [11]. Augusti, membandingkan mode kontrol yang umum digunakan yaitu kontrol PID, FLC, dengan menjaga keluaran dari konverter berada pada tegangan yang ditetapkan, bagaimanapun berubah ubahnya beban maupun masukan konverter. Kontrol tegangan

ini bersifat linier, prosedur kerjanya yaitu membandingkan tegangan keluaran dengan tegangan referensi dan menghasilkan sinyal *error* yang mana dikirim menuju ke kontroler PID untuk menghasilkan sinyal kontrol. Sinyal kontrol tersebut diberikan ke generator PWM untuk mengatur ulang *duty cycle*, dengan metode Ziegler-Nichols dan IMC untuk menentukan parameter PID (K_p , K_i , K_d) [11]. FLC, adalah kontroler non linier yang sesuai untuk konverter dc dc yang juga merupakan sistem non linier, bekerja dengan prosedur mengukur sinyal *error* dan merubah dari sinyal tersebut dan mengatur lebar PWM bergantung pada aturan dari algoritma itu sendiri. Aturan tersebut disimpan pada *lookup table* dalam memori mikrokontroler [11]. Dari hasil penelitian Augusti, masing masing kontroler memiliki kelebihan dan kekurangan masing masing, dimana PID merupakan kontroler sederhana untuk spesifikasi tegangan masukan dan keluaran tertentu sedangkan FLC memiliki fleksibilitas kontrol bergantung pada kompleksitas aturan yang didesain.

2.3 Teori Penunjang

2.3.1 Buck Konverter

Buck konvrter atau konverter *step down* DC-DC memiliki rangkaian dasar yang terdiri dari tegangan input (V_s), saklar yang terkontrol (S), diode blocking (D), filter inductor (L), filter kapasitor (C), dan resistansi beban (R) ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Rangkaian dasar *buck* konverter

Kondisi dari konverter dimana arus pada inductor tidak pernah bernilai nol untuk periode waktu tertentu disebut *continuous conduction*

mode (CCM). Dapat dilihat dari rangkaian yang mana saklar S dikondisikan pada *on state*, diode D pada kondisi *reverse biased*. Ketika saklar S kondisi *off*, diode konduksi untuk mendukung ketidaktergangguannya arus pada induktor. Hubungan antara tegangan masukan, tegangan keluaran, dan rasio siklus pensaklaran/*duty cycle* (D) dapat diturunkan dari gelombang tegangan Gambar 2.2 pada induktor (V_L). Menurut hukum Faraday, tegangan induktor- hasil kali terhadap periode dari operasi *steady state* adalah nol. Untuk *buck* konverter

$$(V_s - V_o)DT = -V_o(1 - D)T \quad (2.1)$$

Oleh karena itu, fungsi transfer tegangan dc, yang didefinisikan sebagai rasio tegangan output ke tegangan input, adalah

$$MV = \frac{V_o}{V_s} = D \quad (2.2)$$

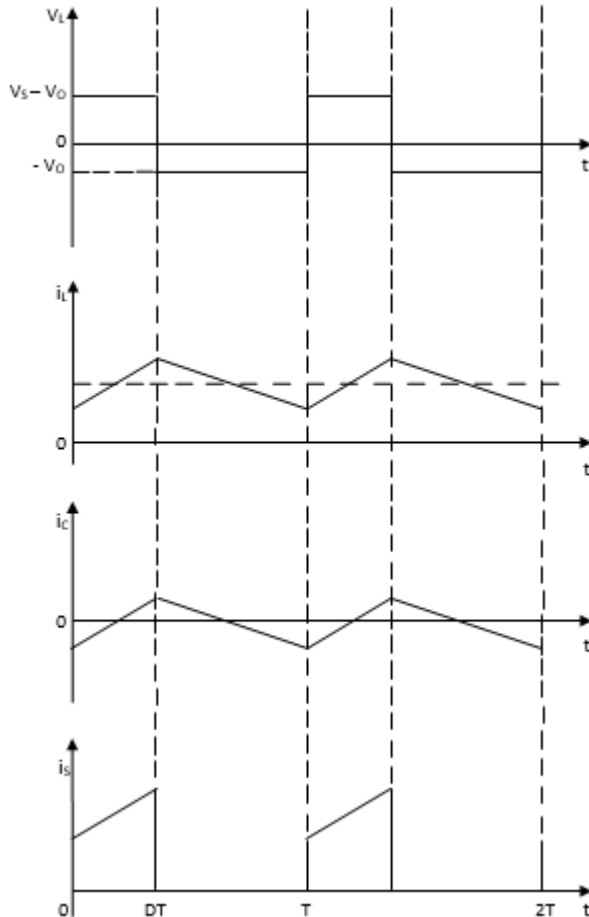
Dapat dilihat dari persamaan 2.2 bahwa tegangan keluaran selalu lebih kecil dari tegangan masukan. Konverter DC-DC dapat beroperasi dalam dua mode berbeda bergantung arus pada induktor I_L . Gambar 2.2 menggambarkan CCM yang mana arus induktor selalu lebih besar dari nol. Ketika nilai rata rata dari arus masukan bernilai rendah (nilai R yang besar) dan/atau frekuensi pensaklaran yang rendah, konverter mungkin memasuki *discontinuous conduction mode* (DCM). Dalam DCM, arus induktor bernilai nol selama berada dalam periode pensaklaran. CCM lebih digunakan untuk optimisasi efisiensi (efisiensi yang tinggi) dan penggunaan yang baik dari saklar semikonduktor dan komponen pasif. DCM dapat digunakan diberbagai aplikasi dengan kebutuhan kontrol khusus, energi yang disimpan di induktor adalah nol pada saat awal dan akhir dari setiap periode pensaklaran. Hal tersebut jarang mencampuradukkan dua mode operasi karena perbedaan dari algoritma pengaturannya. Untuk *buck* konverter, nilai dari filter induktansi menentukan batas antara CCM dan DCM,

$$L_b = \frac{(1 - D)R}{2f} \quad (2.3)$$

Arus konduktor fileter I_L dalam CCM terdiri dari komponen DC I_o dengan ditumpangkan komponen AC triangular. Hampir semua komponen AC mengalir melewati kapasitor filter sebagai arus I_C . Arus I_C menyebabkan riak/*ripple* tegangan yang kecil sepanjang tegangan keluaran DC V_o . Nilai batas *peak to peak* dari riak tegangan dibawah nilai tertentu V_r , kapasitansi filter harus lebih besar dari

$$C_{\min} = \frac{(1-D)V_o}{8V_rLf} \quad (2.4)$$

Persamaan 2.3 dan 2.4 adalah persamaan dasar desain untuk *buck* konverter. Tegangan masukan dan keluaran DC (*duty ratio* D), dan jarak dari resistansi beban R selalu ditentukan oleh spesifikasi awal. Desainer harus menentukan nilai dari komponen pasif L dan C , dan frekuensi pensaklaran f . Nilai dari induktor filter L dihitung dari kondisi CCM/DCM menggunakan persamaan 2.3. Nilai dari kapasitor filter C ditentukan dari kondisi riak tegangan pada persamaan 2.4. Untuk kekompleksan dan rugi rugi konduksi yang kecil untuk konverter, sangat diperlukan penggunaan komponen pasif yang kecil. Persamaan 2.3 dan 2.4 menunjukkan bahwa hal tersebut dapat diselesaikan dengan menggunakan frekuensi pensaklaran yang tinggi.



Gambar 2.2 Waveform buck konverter

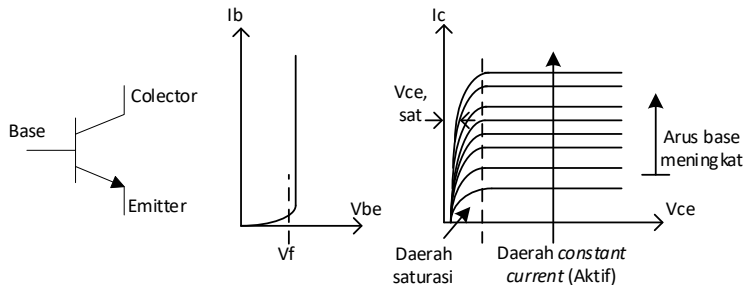
2.3.2 Komponen Elektronika Daya Pendukung

a. Saklar Semikonduktor: Transistor

Transistor merupakan komponen semikonduktor yang memiliki tiga terminal, yaitu satu terminal sebagai pengendali dan dua terminal lainnya sebagai bagian yang dikendalikan. Secara umum keluarga transistor dikelompokkan dalam tiga kelompok, yaitu BJT (*Bipolar*

Junction Transistor), FET (*Field Effect Transistor*), dan IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). Ketiga kelompok tersebut mempunyai susunan semikonduktor yang berbeda, sehingga karakteristik dan cara pengendaliannya juga berbeda-beda.

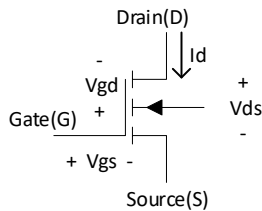
BJT merupakan bentuk keluarga transistor yang paling sederhana dan pertama kali ditemukan pada tahun 1953. BJT memiliki tiga terminal, yaitu Kolektor, Basis, dan Emitor. Terminal Basis digunakan untuk mengendalikan aliran arus pada Kolektor-Emitor. Bentuk gelombang arus yang diumpangkan pada Basis akan dibentuk serupa pada Kolektor-Emitor, tetapi dengan besaran yang berlipa puluhan hingga ratusan kali. BJT memiliki kecepatan pensaklaran paling rendah dibandingkan dengan keluarga transistor yang lain, berkisar pada 5 kHz dan daya hingga 50 kVA. Semakin besar arus yang diumpangkan pada Basis, menghasilkan aliran arus dan tegangan yang lebih besar pula pada terminal Kolektor-Emitor. Simbol untuk BJT dan karakteristiknya dilihat pada Gambar 2.3.



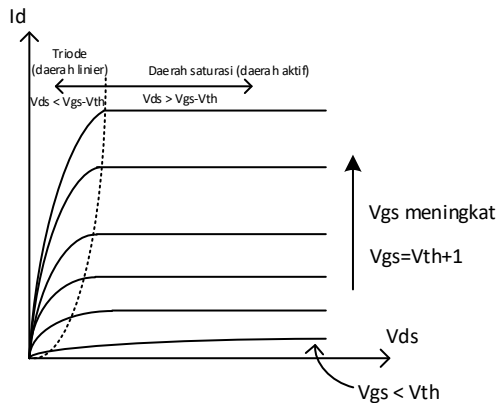
Gambar 2.3 Simbol dan grafik karakteristik BJT

Keluarga transistor yang lain adalah dari golongan FET. Salah satu jenis FET yang umum digunakan dalam aplikasi manufaktur adalah MOSFET. Transistor jenis ini memiliki tiga terminal, yaitu *Source*, *Gate*, dan *Drain*. Terminal *Gate* adalah tempat pengendalian. Berbeda dengan BJT, pengendalian MOSFET bukan menggunakan arus, melainkan tegangan. Pengontrolan menggunakan tegangan sangat memudahkan dalam perancangan suatu rangkaian. MOSFET memiliki keuntungan pada kecepatan pensaklarannya, yang mampu beroperasi hingga ratusan MHz. Karena beroperasi pada kecepatan pensaklaran yang tinggi, kemampuan daya MOSFET akan menurun tajam, frekuensi pensaklaran berkisar hingga 50 MHz dan daya 10kVA. Simbol dari

MOSFET dan karakteristiknya dapat dilihat berurutan pada Gambar 2.4 dan Gambar 2.5.

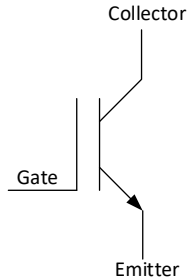


Gambar 2.4 Simbol MOSFET

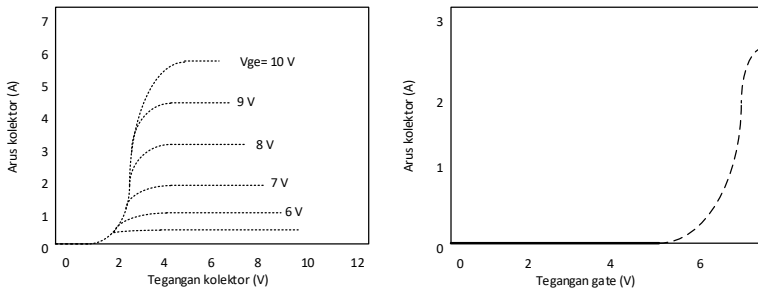


Gambar 2.5 Karakteristik MOSFET

IGBT adalah gabungan antara BJT dan MOSFET. Terminal pengendali berupa *Gate*, sedangkan terminal yang dikendalikan adalah Kolektor dan Emitor. Karakteristik IGBT mirip dengan BJT, tetapi teknik pengendaliannya menggunakan tegangan. Karakteristik kecepatan pensaklaran IGBT berada diantara BJT dan MOSFET dimana, IGBT mampu bekerja pada kecepatan hingga 70 kHz, dengan kemampuan daya 5MVA. IGBT merupakan saklar semikonduktor yang banyak digunakan dalam aplikasi dilapangan. Simbol dari IGBT dan karakteristiknya dapat dilihat berurutan pada Gambar 2.6 dan Gambar 2.7.



Gambar 2.6 Simbol IGBT



Gambar 2.7 Karakteristik *forward* dan transfer IGBT

b. Dioda

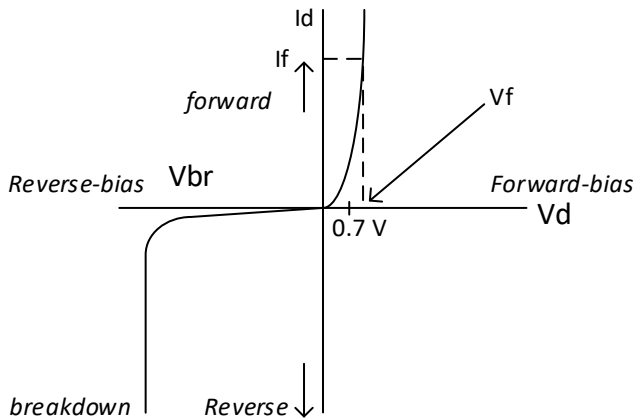
Diode merupakan perangkat semikonduktor daya yang paling sederhana dibandingkan dengan perangkat semikonduktor lainnya (transistor dan thyristor). Diode adalah saklar semikonduktor yang mampu mengalirkan arus dalam satu arah dari terminal Anoda ke Katoda. Diode secara otomatis akan konduksi apabila tegangan Anoda lebih tinggi dari tegangan Katoda dan melebihi tegangan *threshold* semikonduktor, yaitu sekitar 0.7 atau 0.9 volt. Sebaliknya, diode secara otomatis akan padam apabila arus yang mengalir kurang dari arus minimum (*holding current*).

Diode dalam kondisi *forward bias* atau konduksi pada saat ada aliran arus I_F . Pada kedua terminal timbul tegangan drop, V_F , yang besarnya proporsional terhadap besar arus I_F . Sebaliknya diode berada dalam kondisi *reverse bias* atau tidak konduksi, untuk kurva yang berada disebelah kiri sumbu vertikal I_D . Dioda non-ideal terdapat arus bocor, digambarkan dengan arus negative dibawah sumbu horizontal

V_D . Dalam kondisi *reverse bias*, diode akan secara otomatis konduksi apabila tegangan balik tersebut melebihi V_{BR} .



Gambar 2.8 Simbol dioda



Gambar 2.9 Karakteristik diode

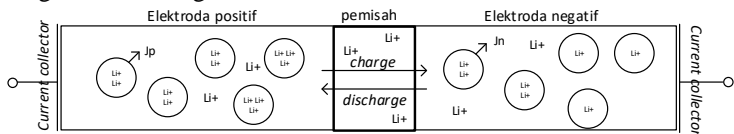
Salah satu jenis diode yang dimanfaatkan fungsi V_{BR} adalah jenis diode zener. Diode zener pada umumnya digunakan untuk menstabilkan tegangan. Sebuah zener diode memiliki tegangan V_{BR} tertentu sesuai dengan desain pabrikannya.

2.3.3 Karakteristik Li-ion

a. Teori Baterai Lithium-ion (Li-ion)

Baterai Li-ion terdiri dari lima komponen utama, yaitu dua metalik pengumpul arus (*current collector*), elektroda katoda, elektroda anoda, dan pemisah (*separator*) dengan elektrolit, diilustrasikan pada. Prinsip bagaimana sel dari Li-ion bekerja, yaitu saat melepas muatan (*discharging*), katoda adalah suatu Lithium Oksida (Li_2O) dan anoda suatu material karbon. Saat pengisian muatan (*charging*), sebuah arus

diberikan pada sel yang menjebakkan Li-ion *de-intercalate* (pelepasan molekul yang ada diantara dua buah titik) dari katoda menuju elektrolit, berjalan melalui elektrolit menuju anoda, dan intercalate menuju anoda. Tujuan dari elektrolit mempunyai konduktifitas listrik yang kecil tetapi memungkinkan perpindahan dari ion. Hasilnya, ion ion dapat berpindah dari satu elektrode ke yang lain ketika elektron berjalan melewati sirkuit eksterior melalui current collectors dari katoda menuju anoda daerah saat charge dan discharge.

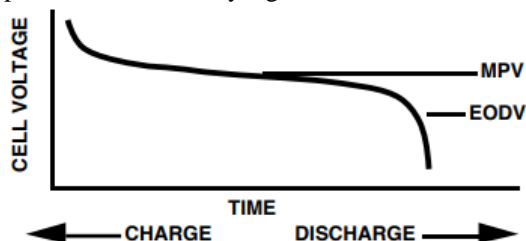


Gambar 2.10 Bagian baterai dan perpindahan ion baterai Li-ion

Pemisah atau *separator* berfungsi untuk mencegah hubung singkat (short circuit) dengan menciptakan pembatas antara dua elektroda. Katoda adalah sumber dari Li-ion dan menjelaskan kapasitas dari sel. Parameter penting dari elektroda adalah yang mana dapat berdampak pada performa sel adalah ukuran partikel distribusi, bentuk partikel, daerah permukaan spesifik dan kerapatan tap.

b. Karakteristik *charging* Li-ion

Mid point voltage (MPV) adalah nilai tegangan nominal dari sel pada saat *charge* atau *discharge*. Tegangan ekskusi tertinggi dan terendah dari nilai nominal adalah pertimbangan desain yang sangat penting: semakin ratanya kurva *discharge* berarti semakin sedikitnya variasi tegangan pada desain tersebut yang ditoleransi.

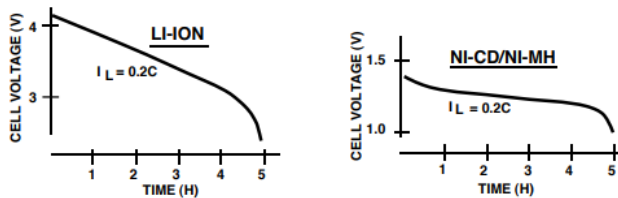


Gambar 2.11 Kurva *charge discharge* baterai

Saat puncak *charged*, tegangan aktual sel akan lebih tinggi dari MPV. Ketika mendekati titik *end of discharge voltage* (EODV), tegangan sel akan lebih rendah dari MPV. Terkadang EODV disebut sebagai tegangan *end of life* (EOL) oleh produsen produsen baterai.

Secara garis besar, densitas energi baterai dibagi menjadi dua macam yaitu gravimetrik dan volumetrik. Densitas energi gravimetrik dari baterai mengukur seberapa banyak energi yang terdapat pada baterai dibandingkan dengan beratnya, dan disebutkan dalam satuan Watt-hour/kilogram (W-hr/kg). densitas energi volumetrik dari baterai mengukur seberapa banyak energi yang terdapat pada baterai dibandingkan dengan volumenya, dan disebutkan dalam satuan Watt-hour/liter (W-hr/l). Baterai Li-ion memiliki nilai densitas energi gravimetrik dan volumetrik berturut turut sebesar 90W-hr/kg dan 210W-hr/l, lebih besar dibandingkan dengan jenis baterai *rechargeable* lainnya seperti Ni-MH (55W-hr/kg, 180W-hr/l) dan Ni-Cd (50W-hr/kg, 140W-hr/l). Terlihat bahwa baterai Li-ion lebih efektif dalam ketersediaan energi terhadap berat dan volumenya dibandingkan baterai dengan jenis lain.

Baterai Li-ion ememiliki tegangan nominal sebesar 3.6V, yang mana lebih besar dibandingkan tegangan nominal dari baterai jenis Ni-Cd dan Ni-MH (1.25V). Perbedaan antara jenis baterai tersebut yang mana sel Ni-Cd dan Ni-Mh sangat cocok digunakan untuk regulator linier, namun baterai Li-ion membutuhkan konverter *switching* untuk menghasilkan konversi energi yang baik dalam sumber daya listrik.



Gambar 2.12 Kurva *discharge* sel baterai

Arus maksimum pada baterai yang dapat dialirkan secara langsung bergantung pada *equivalent series resistance* (ESR) dari baterai. Arus yang mengalir dari baterai pasti melewati ESR, yang aman akan menurunkan tegangan terminal baterai sebesar:

$$V = I \times R \quad (2.5)$$

R merupakan nilai ESR dan I adalah arus beban. Lebih penting lagi, adanya arus yang melewati ESR akan menyebabkan hilangnya daya dalam baterai sebesar:

$$P = I^2 \times R \quad (2.6)$$

Hasil ini merupakan panas dalam baterai dalam rating tinggi dari *discharge*. Nilai ESR baterai umumnya sangat kecil sekitar $0.1 \, \Omega$ untuk jenis sel AA, yang artinya hampir tidak ada batasan untuk arus puncak *discharge*. Baterai Li-ion memiliki nilai ESR yang lebih besar dari $0.1 \, \Omega$ (baterai Ni-Cd atau Ni-MH).

Sel Li-ion dapat dikatakan aman bila *charging* dilakukan pada suhu antara nol sampai empat puluh lima derajat selsius. Jangkauan suhu operasi pada saat *discharge* sekitar -20 sampai 60 derajat selsius.

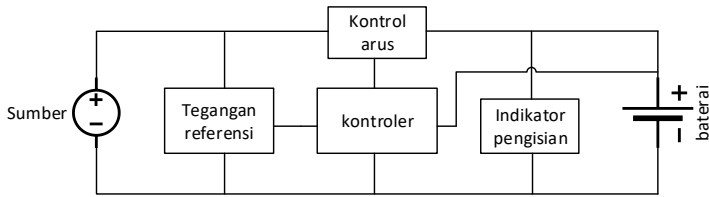
2.3.4 Charging Mekanisme

a. Constant Voltage (CV)

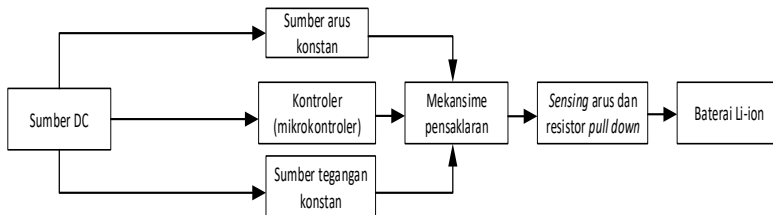
Metode ini menggunakan sumber DC yang mana sangat sederhana hanya membutuhkan transformer penurun tegangan (*step down*) dari utama dengan penyearah dan menghasilkan sumber tegangan DC untuk pengisian muatan dari baterai. Desain cukup sederhana dan sering ditemukan pada charger baterai mobil yang murah. Penerapan pada Li-ion, *charger* model CV dilengkapi dengan rangkaian lebih kompleks dengan penambahan proteksi untuk keamanan baterai dan penggunaanya.

b. Constant Current (CC)

CC *charger* bervariasi tegangan yang diterapkan pada baterai untuk mengatur aliran arus konstan, mematikan saklar jika tegangan mencapai level terisi penuh (*full charge*). Desain ini banyak digunakan pada sel baterai jenis Nickel Cadmium (Ni-Cd) dan Nickel Metal Hydride.



Gambar 2.13 Skema CC *charger*



Gambar 2.14 Diagram blok *charger* mode CCCV

c. Pulse Charging (PC)

Metode PC merubah arus *charging* kepada baterai dalam bentuk pulsa pulsa. Tingkat pengisian (berdasar pada arus rata rata atau average current) dapat tepat dikendalikan dengan mengatur lebar dari pulsa pulsa, sekitar satu detik. Pada saat proses *charging*, periode istirahat sejenak dari 20 sampai 30 milidetik antara pulsa memberikan reaksi kimia pada baterai untuk stabil oleh reaksi penyetaraan sepanjang sebagian besar elektroda sebelum memulai charge kembali. Hal ini memungkinkan reaksi kimia untuk mengimbangi laju dalam proses pemasukkan energi listrik. Dikatakan juga, bahwa metode ini dapat mengurangi reaksi kimia yang tidak diinginkan pada permukaan elektroda seperti pembentukan gas, pertumbuhan kristal dan passivasi. Jika diperlukan, dapat dilakukan pengambilan sampel tegangan rangkaian terbuka dari baterai saat periode istirahat sejenak.

PC menggunakan rangkaian transistor yang juga bisa disaklarkan (switched). Dengan voltase baterai rendah, transistor tetap menyala dan melakukan arus sumber langsung ke baterai. Karena tegangan baterai mendekati tegangan regulasi yang diinginkan, transistor seri memberikan masukan arus masukan untuk mempertahankan voltase yang diinginkan. Karena berfungsi sebagai pasokan mode saklar untuk sebagian siklus, dapat berfungsi mengurangi panas yang lebih sedikit dan karena bertindak sebagai bagian pasokan linier dari waktu, saringan

keluaran dapat lebih kecil. Arus pulsa memungkinkan waktu baterai untuk menstabilkan (pulih) dengan penambahan bertahap yang rendah pada tingkat pengisian yang semakin tinggi selama pengisian daya. Selama periode istirahat, polarisasi sel diturunkan. Proses ini memungkinkan pengisian lebih cepat dari pada yang mungkin dengan satu muatan tingkat tinggi yang berkepanjangan yang dapat merusak baterai karena tidak memungkinkan stabilisasi bahan kimia aktif selama pengisian ulang secara bertahap. Pengisi daya pulsa biasanya memerlukan batasan arus pada sumber input karena alasan keamanan dan menambah biaya.

d. *Burp Charging*

Dapat disebut juga *reflex* atau *negative pulse charging*, digunakan bersamaan dengan PC, mengaplikasikan waktu *discharge* pulsa yang sangat singkat, sekitar dua sampai tiga kali dari arus *charging* untuk 5 milidetik, pada saat periode *charging* istirahat untuk depolarize (menurunkan terjadinya peristiwa polarisasi) pada sel. Pulsa pulsa tersebut menghilangkan gelembung gas yang terdapat pada elektroda pada waktu pengisian cepat atau *fast charging*, mempercepat proses stabilisasi dan karenanya proses pengisian keseluruhan. Pelepasan dan difusi gelembung gas dikenal sebagai "bersendawa" atau "*burping*". Klaim kontroversial telah dibuat untuk perbaikan baik dalam tingkat biaya dan masa pakai baterai maupun untuk penghapusan dendrit yang dimungkinkan oleh teknik ini.

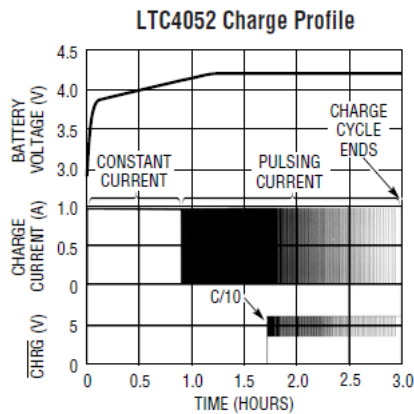
-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

BAB III

PERANCANGAN DAN SIMULASI *BUCK* KONVERTER KONTROL KELUARAN CCPC

3.1 Strategi Kontrol *Buck* CCPC

Charger baterai Li-ion *Constant Current Pulse Charging* (CCPC) ini mengadaptasi karakteristik IC milik *Linear Technology* dengan tipe LTC4052-4.2, yang memiliki karakteristik *charging* seperti pada Gambar 3.1.



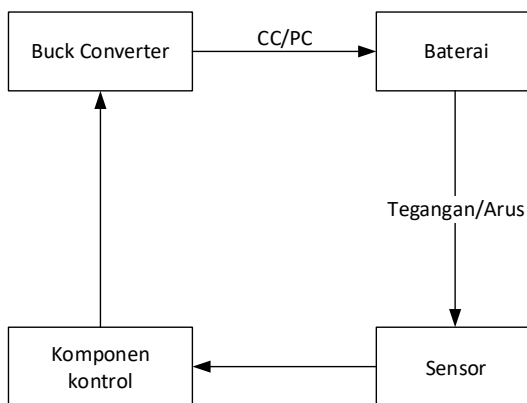
Gambar 3.1 *Charge profile* IC LTC4052 [13]

IC tersebut menerapkan arus konstan pada awal pengisian hingga tegangan baterai mencapai 70-75% dari tegangan rating baterai. Kemudian, menggunakan arus berupa pulsa yang frekuensinya disesuaikan dengan karakteristik baterai (impedansi baterai) hingga kapasitas baterai terisi. Menurut tinjauan literatur, menyebutkan bahwa metode *constant voltage* yang membutuhkan waktu lama hingga baterai terisi penuh dapat ditanggulangi menggunakan metode *pulse charging*. Dimana kecepatan *charging pulsing* dikarenakan arus pulsa menghasilkan ion dari elektrolit tersebar dan terdistribusi dengan intensitas lebih tinggi yang menghambat polarisasi, arus pulsa menghasilkan waktu istirahat (*rest period*) bagi ion untuk menyebar dan menetralkan [14]. *Charging pulse* menerapkan tegangan dan arus pulsa pada baterai, dengan frekuensi yang diatur sehingga mendapatkan arus

charging rata rata yang maksimum (merupakan arus *charging* optimal) [14]. Nilai frekuensi ini didapatkan dari metode trial dan error secara manual.

Berdasarkan referensi dari perubahan mode *charging* CC menjadi PC[13], dan referensi *charging* parameter dari PC [14], *prototype* desain dan implementasi *charger* yang dirancang mengaplikasikan kedua parameter dari sumber tersebut. Frekuensi dapat diubah ubah melalui program mikrokontroler, namun pada pengujian *prototype charger* ini diterapkan frekuensi pulsa 100 Hz dan 1 kHz [14].

Dipaparkan dalam diagram blok, strategi *charger* menggunakan kontrol CCPC seperti pada gambar 3.2;



Gambar 3.2 Diagram blok strategi CCPC

3.2 Perencanaan Perancangan

Baterai yang digunakan sebagai sumber energi dari kendaraan berbasis tenaga listrik atau *Electric Vihecle* (EV) adalah jenis Li-ion, memiliki 24 sel baterai dengan tegangan rating 86,4 volt (rating tegangan rating tiap sel nya 3,6 volt) dan kemampuan mengalirkan arus 34 Ah. Dengan spesifikasi baterai tersebut, dirancang *charger* yang harus memenuhi dari aspek tegangan, arus, kemampuan daya, dan memiliki keluaran sesuai dengan karakteristik baterai yang digunakan. Berikut spesifikasi yang ditentukan untuk desain *charger* CCPC;

Tabel 3.1 Spesifikasi *Charger*

Spesifikasi	Nilai (satuan)
Tegangan keluaran (Vo)	0-120 (Volt)
Arus Maksimum (I max)	5 (Ampere)
Daya Maksimum (P max)	600 (Watt)

3.3 Desain dan Perhitungan Pemilihan Komponen

3.3.1 Buck Konverter

Buck konverter dipilih karena memiliki kelebihan fleksibilitas pengaturan terminal keluaran, yang dapat diubah ubah dengan mengatur PWM dari MOSFET konverter. Dengan rating tegangan keluaran 120 VDC, didapatkan PWM maksimum melalui perhitungan;

Perhitungan *Duty cycle* (D):

$$\text{Tegangan Keluaran}(V_{\text{out}}) = 120\text{Volt}$$

$$\text{Tegangan Masukan}(V_{\text{in}}) = 311\text{Volt}$$

$$D = \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} \quad (3.1)$$

$$D = \frac{120}{311}$$

$$D = 0.38 = 38\%$$

Dengan daya 500 watt, dan frekuensi switching dipilih 100 kHz, dicari nilai resistor keluarannya (R_{out}):

$$R = \frac{V^2}{P} \quad (3.2)$$

dimana,

R = Resistor keluaran(Ω)

V = Tegangan(V)

P = Daya(W)

$$R = \frac{120^2}{600}$$

$$R = 24\Omega$$

Menghitung arus keluaran (I_{out}), dengan daya 600 watt dan tegangan 120 volt:

$$I_{out} = \frac{P}{V} \quad (3.3)$$

dimana,

I_{out} = Arus keluaran

P = Daya

V = Tegangan

$$I_{out} = \frac{600}{120}$$

$$I_{out} = 5 \text{ Ampere}$$

Menghitung ripple arus, dipilih ripple arus (ΔI_L) sebesar 20% (standar ripple adalah 20-40%) [12]. Dengan arus keluaran 5 ampere didapatkan:

$$\Delta I_L = \% \text{ripple} \times I_{out} \quad (3.4)$$

I_{out} = Arus keluaran

$$\Delta I_L = 20\% \times 5$$

$$\Delta I_L = 1.0 \text{ Ampere}$$

Setelah didapatkan nilai ripple arus sebesar 1 ampere, dapat dihitung nilai inductor untuk rangkaian *buck*;

$$L = \frac{V_{out} \times (V_{in} - V_{out})}{fs \times \Delta I_L \times V_{in}} \quad (3.5)$$

dimana,

L = nilai induktor

V_{in} = tegangan masukan

V_{out} = tegangan keluaran

f_s = frekuensi switching; dipilih frekuensi 100kHz,

dengan tujuan memperkecil nilai induktor filter.

ΔI_L = ripple arus

$$L = \frac{120 \times (311 - 120)}{1 \times 10^5 \times 1 \times 311}$$

$$L = 7.3 \times 10^{-4} H = 0.73 mH$$

Didapatkan nilai induktor minimal untuk mendapatkan riak arus sebesar 20% sebesar 0.73 mH. Dilakukan realisasi nilai induktor yang dibutuhkan dengan menggunakan inti *EE-core* dengan kawat tembaga sebagai *coil* induktor, didapatkan induktor dengan induktansi sebesar 14mH agar didapatkan riak arus yang lebih kecil. Dengan rating arus yang digunakan sebesar 5 Ampere, dipilih kawat tembaga untuk induktor dengan diameter 1.8 yang tahan terhadap arus hingga 12 Ampere.

Kemudian, dapat dihitung nilai dari kapasitor keluaran (C_{out}) dari rangkaian *buck*,

$$C_{out} = \frac{\Delta I_L}{8 \times f_s \times \Delta V_0} \quad (3.6)$$

dimana,

C_{out} = kapasitor keluaran

ΔI_L = ripple arus

f_s = frekuensi switching

ΔV_0 = ripple tegangan output

dengan rumus $\Delta V_0 = \% \text{ ripple} \times V_0$

dimana, $\% \text{ ripple} = \text{presentasi ripple}$ dipilih (dipilih $\% \text{ ripple}$ sebesar 1%)

V_0 = tegangan keluaran

Sehingga didapatkan $\Delta V_0 = 1\% \times 120$

$$\Delta V_0 = 1.2 \text{ Volt}$$

Nilai riak arus juga dipengaruhi oleh resistansi dalam kapasitor atau *equivalent series resistance* (ESR).

$$\Delta V_0^{\text{total}} = \Delta V_0 + (\text{Resistansi Internal Kapasitor} \times \Delta I_L) \quad (3.7)$$

dapat dicari nilai kapasitor,

$$C_{out} = \frac{1.04}{8 \times 100000 \times 1.2}$$

$$C_{out} = 1.08 \mu\text{F}$$

Didapatkan nilai kapasitor minimal untuk riak tegangan sebesar 1% yaitu 1.35 μF . Dipilih kapasitor dengan kapasitansi dengan 5 μF tegangan 400 Volt untuk mencukupi rating tegangan masukan sumber 311 VDC. Sehingga didapatkan riak tegangan dengan kapasitor terpilih:

$$\Delta V_0 = \frac{1.04}{8 \times 10^5 \times 5 \times 10^{-6} \times 120}$$

$$\Delta V_0 = 0.2\%$$

Pemilihan diode penyearah:

Menentukan arus rating *forward* maksimum oleh diode menggunakan rumus:

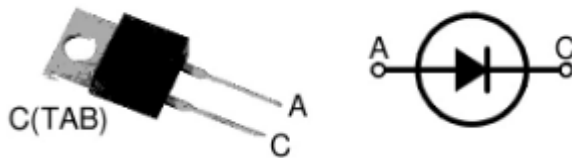
$$I_F = I_{OUT(\text{Max})} \times (1 - D) \quad (3.8)$$

Dimana I_F adalah arus *forward* dioda rata rata, $I_{OUT(\text{Max})}$ adalah arus maksimum keluaran.

$$I_F = 5.2 \times (1 - 0.38)$$

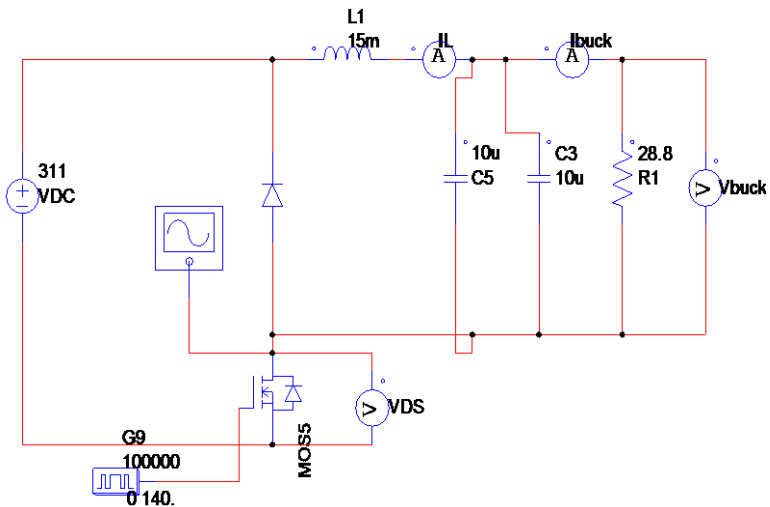
$$I_F = 3.22 \text{ Ampere}$$

Dipilih dioda jenis schottky MUR1560 *ultra fast recovery* yang sering diaplikasikan pada rangkaian switching kecepatan tinggi, dan memiliki rating arus puncak lebih tinggi daripada rating rata rata. Oleh karena itu, adanya arus puncak pada sistem tidak menjadi masalah. MUR1560 memiliki rating bloking tegangan DC maksimum sebesar 600 Volt dan arus *forward* (I_F) maksimum sebesar 15 Ampere. Dengan spesifikasi tersebut, dioda dapat menangani disipasi daya hingga 1,9 kW.



Gambar 3.3 Dioda MUR 1560

Didapatkan semua parameter frekuensi switching, nilai inductor, nilai kapasitor. Dengan menggunakan sumber 311 volt dc yang didapat dari penyearah, keseluruhan rangkaian menjadi seperti berikut pada Gambar 3.4.

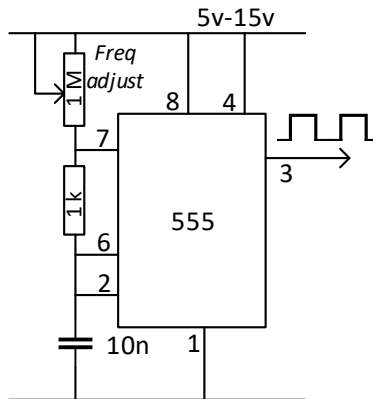


Gambar 3.4 Desain Buck konverter

3.3.2 Pemilihan MOSFET dan Driver MOSFET

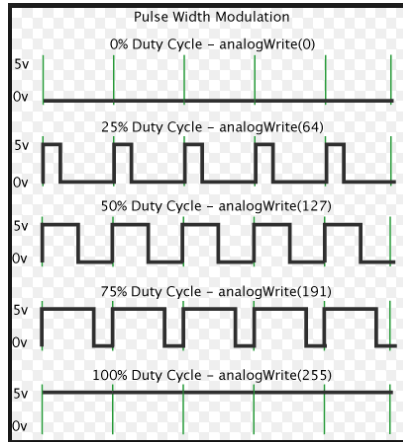
Diperlukannya rangkaian pemberi sinyal untuk *switching* dari MOSFET.

MOSFET bekerja sebagai saklar yang dapat dioperasikan dengan frekuensi tertentu sesuai dengan kebutuhan. Sinyal trigger diperlukan untuk merubah *state* MOSFET dari *on* menjadi *off* atau sebaliknya. Sinyal trigger tersebut didapatkan dari devais penghasil sinyal (*signal generator*) seperti IC PWM (*Pulse Width Modulation*) NE555 yang dikombinasikan dengan *oscillator* (pengatur frekuensi).



Gambar 3.5 Contoh *pulse generator* NE 555

Lebar pulsa (*Duty cyle*) dan nilai frekuensi pulsa lebih mudah diatur dan diubah ubah jika menggunakan mikrokontroller modern seperti ATmega, ArduinoMega, Raspberry dan sejenisnya. Pengaturan lebar pulsa dan frekuensi dilakukan dengan memasukkan perintah berupa program kedalam mikrokontroller yang mengirimkan sinyal keluaran pada pin digital *output*-nya. Keluaran sinyal pulsa dari pin digital *output* tersebut bernilai 0-5 Vpp (tegangan *peak to peak*) dengan nilai Vrms-nya sebesar 2.5 Volt. Dengan sinyal tersebut, sangat tidak dianjurkan untuk *trigger*, khususnya Power MOSFET yang memiliki nilai tegangan Gate-Soure (V_{GS}) yang jauh lebih besar dari 2.5 Volt. Jadi, diperlukan perangkat penghubung antara pin digital *output* mikrokontroler dengan pin *gate* dari MOSFET.

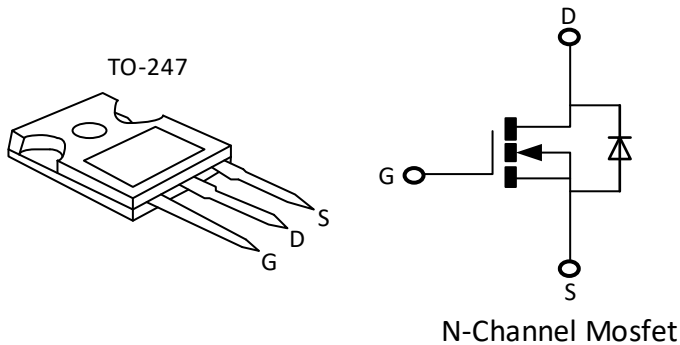


Gambar 3.6 Sinyal keluaran pin digital mikrokontroler

Formula mengatur *duty cycle* pin digital keluaran mikrokontroler mengacu pada gambar 3.6, yaitu:

$$\text{analogWrite} = \text{duty cycle } (\% / 100) \times 255 \quad (3.9)$$

Jenis MOSFET yang dipilih untuk switching pada desain *buck* konverter memenuhi rating minimal dengan arus minimal 5 Ampere dan tegangan 120 Volt. MOSFET jenis N-channel IRFP460 dengan tegangan drain source (V_{DS}) 500 Volt, dan arus drain (I_D) 20 Ampere memenuhi rating system. Tegangan gate-source (V_{GS}) yang dapat diterima sebagai trigger maksimal sebesar 20 Volt dengan frekuensi *switching* maksimum hingga 1MHz.

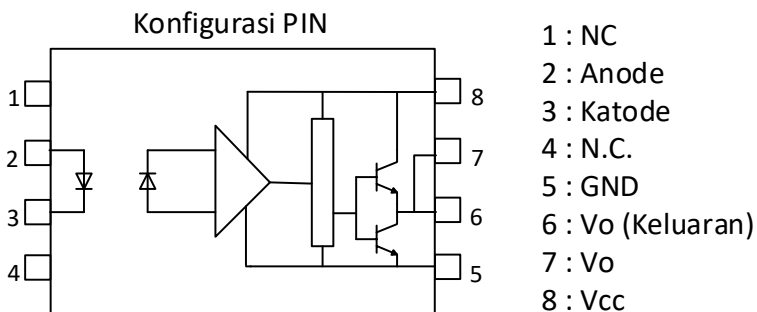


Gambar 3.7 MOSFET dan simbol IRFP 460

Dengan sinyal PWM 2.5 volt tidak dapat melakukan *trigger* pin gate MOSFET. Diperlukan driver MOSFET, dipilih optocoupler jenis TLP 250 yang memiliki kemampuan switching tinggi dan isolasi tegangan hingga 2.5kV.



Gambar 3.8 Skema pengendalian MOSFET



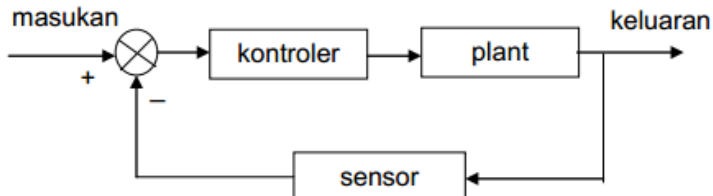
Gambar 3.9 Konfigurasi Pin IC TLP 250

3.3.3 Pulsa Arus dan Tegangan

Desain rangkaian *pulse current* menggunakan prinsip *switching* dari MOSFET untuk menghasilkan tegangan dan arus pulsa. Keluaran *buck* konverter dirubah menjadi sinyal pulsa dengan frekuensi tertentu (sesuai dengan karakteristik baterai), menggunakan MOSFET dan *driver* nya yang nilai frekuensi *switching*-nya dikontrol dengan mikrokontroler.

3.3.4 Perancangan Kontrol *Charger*

Untuk pengaturan keluaran *charger* yang nilainya disesuaikan dengan karakteristik dan kondisi baterai, diperlukan sistem loop tertutup seperti pada Gambar 3.10, dengan deskripsi *plant* merupakan bagian yang akan dikendalikan (*plant* disini adalah keluaran *charger* yang dikendalikan tegangan dan arusnya), kontroler merupakan pengendali kondisi *plant* (disini kontroler mengatur keluaran arus dan tegangan *plant* dengan merubah *duty cycle* PWM), sensor sebagai pengumpan balik data dari *plant* (tegangan dan arus) juga sebagai masukan kontroler, yang menentukan naik atau turunnya *duty cycle*. Komponen yang diperlukan untuk realisasi kontrol keluaran *charger* adalah kontroler, sensor dan *plant* (*buck* konverter yang dibahas pada perancangan sub-bab sebelumnya). Dengan perancangan komponen tersebut sedemikian rupa, dapat dihasilkan keluaran *charger* yang menyesuaikan dengan kondisi baterai.

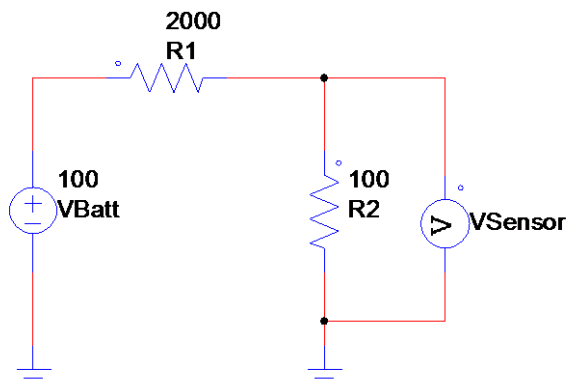


Gambar 3.10 Sistem loop tertutup

a. Sensor Tegangan

Sensor tegangan diperlukan untuk melakukan *tracing* tegangan dari baterai dan data hasil *tracing* tersebut diumpankan menuju mikrokontroler. Mikrokontroler memproses sinyal tersebut, dan memberi respon sinyal kontrol dalam bentuk perubahan *duty cycle*. *Duty cycle* yang dapat merubah nilai keluaran *buck* konverter, disesuaikan dengan kondisi dan karakteristik *charging* baterai.

Perancangan sensor tegangan, berdasarkan prinsip kerja pembagi tegangan dengan rangkaian seperti pada Gambar 3.11. Aturan yang ditentukan, rentang V_{out} (masukan analog untuk Arduino) adalah minimal 0 volt dan maksimal 5 volt, dan rentang V_{in} (dari baterai) adalah minimal 0 volt dan maksimal 100 volt.



Gambar 3.11 Perencanaan sensor tegangan

$$V_{out} = \frac{R2}{R1 + R2} \times V_{in} \quad (3.10)$$

Dipilih nilai $R1$ sebesar $1K\Omega$. Sehingga didapatkan nilai $R2$:

$$5 = \frac{R2}{2000 + R2} \times 100$$

$$10000 + 5R2 = 100R2$$

$$R2 = \frac{10000}{95}$$

$$R2 = 105.2 \Omega$$

Dengan nilai $R1$ dan $R2$ sudah diketahui, maka dipilih resistor pembagi tegangan yang mendekati nilai perhitungan yaitu $2K\Omega$ dan 100Ω .

Diperlukan juga perhitungan kapasitas daya maksimum yang dapat diserap oleh resistor pembagi tegangan untuk menghindari disipasi daya yang berlebihan dan mengakibatkan panas hingga resistor terbakar. Dengan rumus perhitungan daya:

$$P = I^2 R \quad (3.11)$$

Dimana P merupakan daya rating dari R1 dan R2, I adalah arus yang mengalir pada *loop* R1 dan R2. Dengan nilai R1 dan R2 diketahui, dan melalui simulasi didapatkan arus mengalir pada *loop* pembagi tegangan sebesar 45mA. Maka daya rating resistor yang dibutuhkan adalah:

Untuk rating daya R1:

$$P = (4.5 \times 10^{-2})^2 2k$$

$$P = 4.05 \text{ Watt}$$

Untuk rating daya R2:

$$P = (4.5 \times 10^{-2})^2 100$$

$$P = 0.20 \text{ Watt}$$

Didapatkan daya rating untuk R1 dan R2 sebesar 4.05 Watt dan 0.2 Watt. Dipilih daya untuk R1 sebesar 5 Watt dan R2 sebesar 2 Watt.

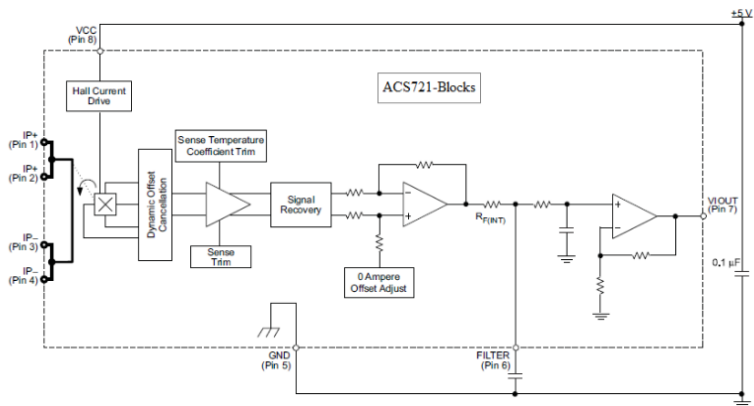
b. Sensor arus

Dua buah potensial tegangan yaitu potensial tegangan keluaran *buck* (keluaran *charger*) dan potensial tegangan baterai. Pengaturan arus konstan adalah kontrol untuk menjaga arus yang mengalir dari *charger* menuju baterai dalam nilai yang tetap (sesuai dengan karakteristik baterai). Untuk merancang kontrol arus konstan/*constant current* (CC) diperlukan sensor untuk melakukan *trace* arus diantara *charger* dan baterai. Sensor arus memiliki fungsi sebagai pengumpan balik data arus tersebut menuju kontroler, merubah *duty cyle* untuk mengatur keluaran tegangan *charger* agar memiliki perbedaan potensial yang tetap dengan baterai (baterai dalam keadaan *charging*, dengan potensial yang terus meningkat) sehingga kondisi CC dapat dipenuhi.

Sensor arus yang digunakan adalah ACS 712 dengan rating arus sebesar 30 Ampere (*plant* menggunakan arus sebesar 5 Ampere), seperti pada Gambar 3.12. ACS 712 memiliki keluaran tegangan 0-5 Volt yang sesuai dengan masukan pin analog dari mikrokontroler, sehingga tidak diperlukan rangkaian pengondisi sinyal agar sensor dapat dibaca oleh mikrokontroler.



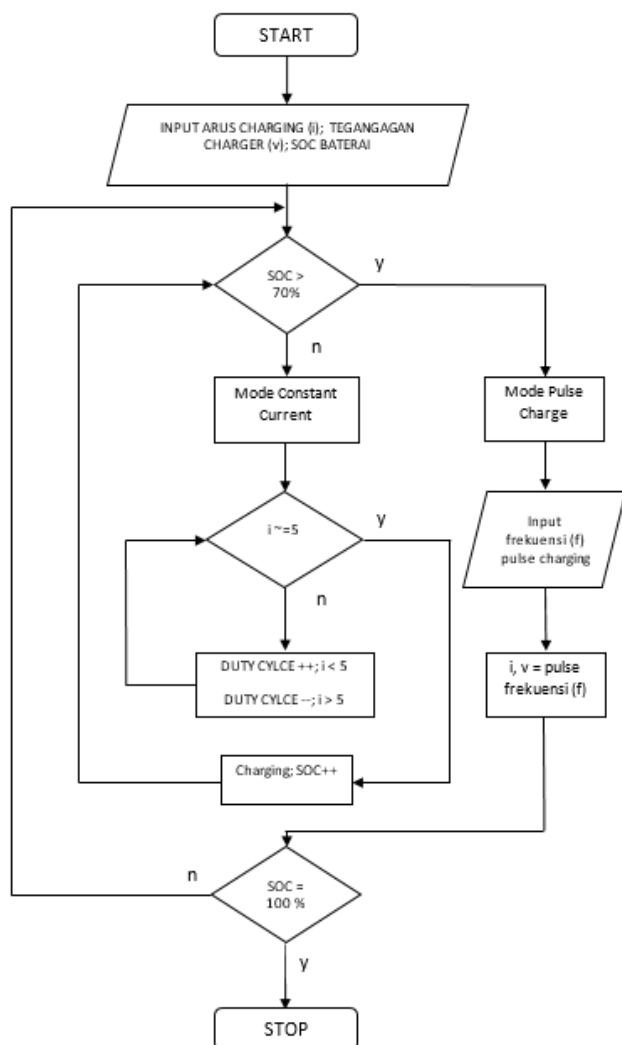
Gambar 3.12 ACS 712



Gambar 3.13 Blok diagram fungsional ACS 712

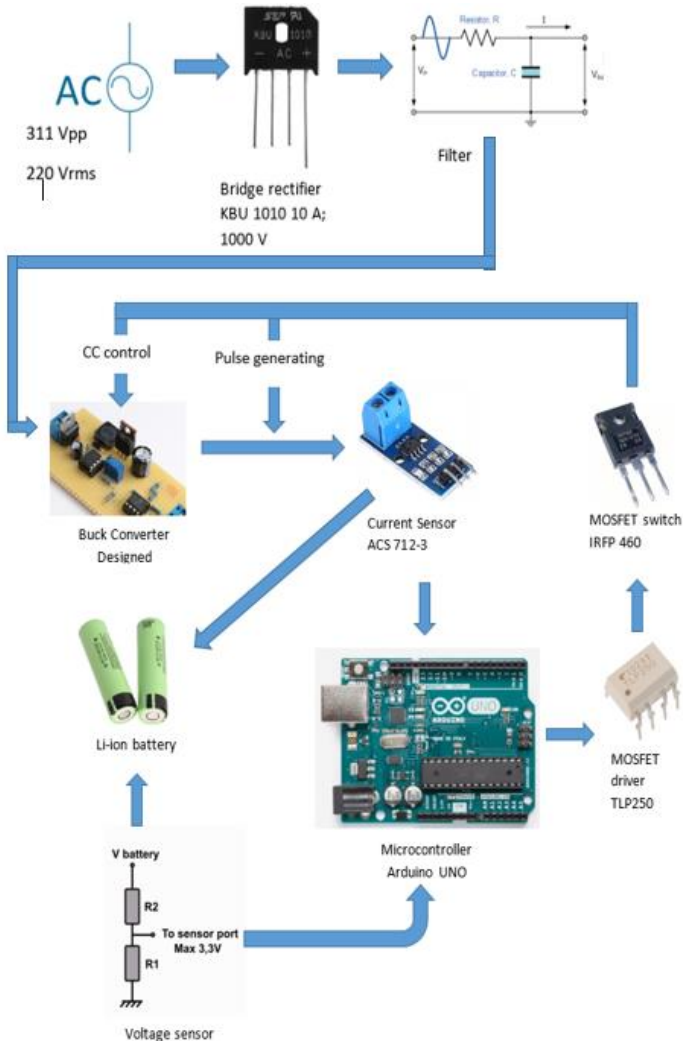
c. Constant Current Pulse Charging (CCPC) Control

Keluaran *buck* konverter untuk charger baterai Li-ion agar didapatkan kondisi *charging* dengan arus konstan pada *state of charge* (SOC) baterai 0-75% dan SOC baterai 75-100% dikontrol melalui program mikrokontroler, dengan data arus dan tegangan dari sensor. Mengatur arus menuju beban dengan melakukan menaikkan dan menurunkan tegangan terminal *charger* baterai. Mengatur tegangan terminal dengan merubah rubah *duty cycle*, yang pasti tidak melebihi tegangan output rating yaitu 120 volt (*duty cycle* 38%). Arus *charging* konstan dijaga dalam nilai 5 ampere. Secara sistematis dijelaskan dengan *flow chart* perencanaan program CCPC pada Gambar 3.14.



Gambar 3.14 Flow Chart CCPC

Keseluruhan sistem *charger* CCPC yang dirancang, menggunakan seluruh perangkat yang dibahas pada sub-bab 3.3 digambarkan pada Gambar 3.15.



Gambar 3.15 Komponen penyusun sistem *charger* CCPC

3.4 Simulasi Hasil Desain

Setelah didapatkan parameter untuk *buck* konverter melalui perhitungan seperti dibahas pada sub-bab 3.3.2, dilakukan simulasi untuk melihat respons hasil desain. Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB Simulink (untuk melihat data hasil desain *buck* konverter, rangkaian pulse, *charging* baterai pada saat constant current dan pulse *charging*).

3.4.1 Simulasi Buck Konverter

Disimulasikan hasil perancangan dengan parameter sesuai spesifikasi, yaitu:

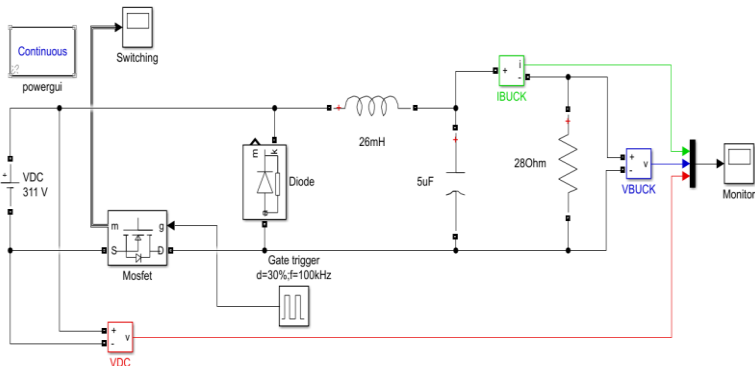
Tegangan *input* 311 VDC

Tegangan *output* maksimum 120 VDC

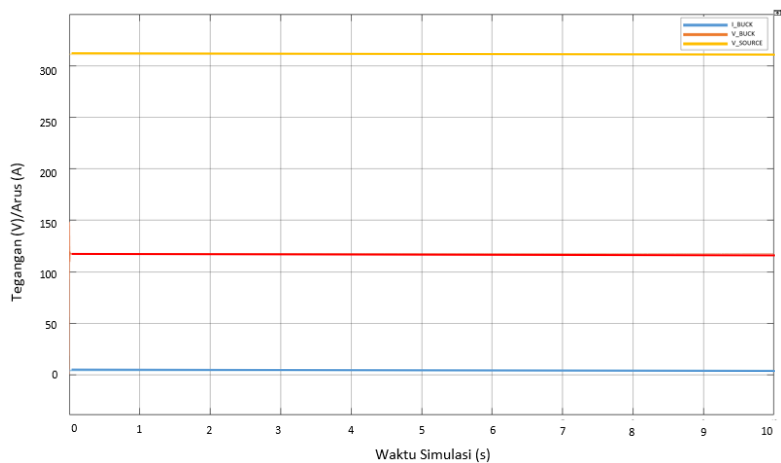
Arus *output* maksimum 5 A

Rating daya *output* maksimum 600 Watt

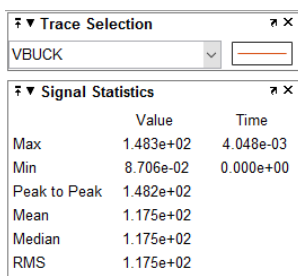
Dengan spesifikasi diatas, disimulasikan *buck* konverter dengan parameter seperti perhitungan dengan kondisi *full load* 500 watt, digunakan beban resistif 28 Ω . Dilihat apakah simulasi hasil desain memenuhi spesifikasi. Dengan diagram blok dan hasil plot simulasi pada Gambar 3.16 dan Gambar 3.17. Data rinci keluaran arus dan tegangan hasil simulasi tertera pada Gambar 3.18 dan Gambar 3.19.



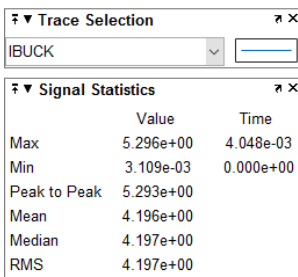
Gambar 3.16 Diagram blok simulasi *buck* konverter



Gambar 3.17 Hasil *plotting* simulasi *buck* konverter



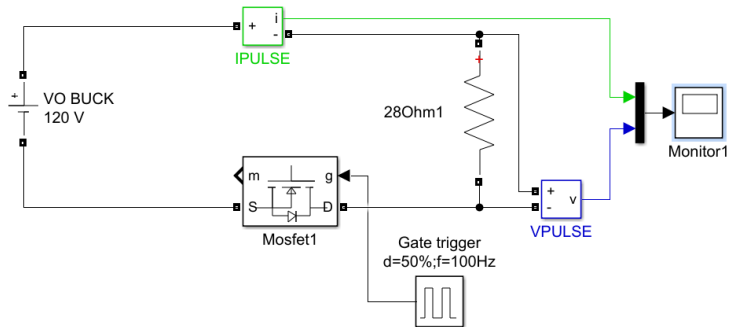
Gambar 3.18 Data keluaran tegangan simulasi *buck* konverter



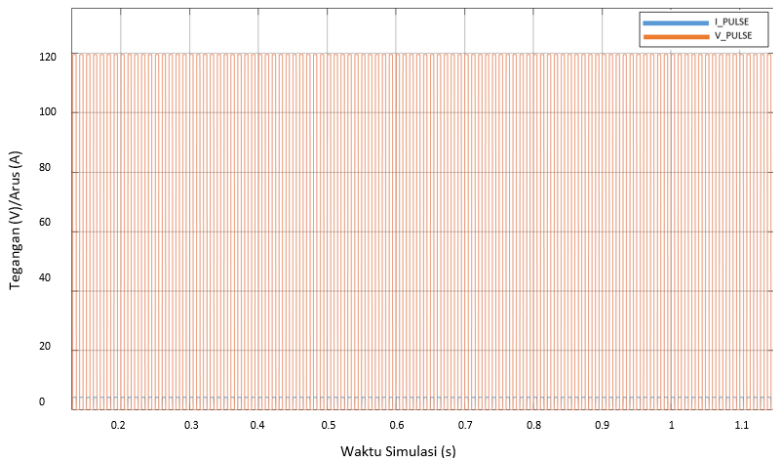
Gambar 3.19 Data keluaran arus simulasi *buck* konverter

3.4.2 Simulasi Rangkaian Pulse Current/Voltage

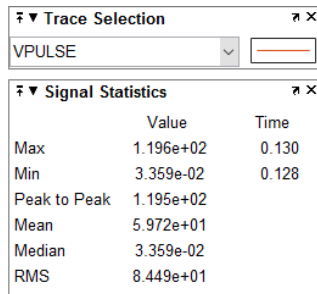
Melakukan simulasi rangkaian pulsa untuk melihat nilai tegangan-
arus rms, pulsa yang terbentuk dari pengendalian *gate* transistor dengan
beberapa nilai frekuensi berbeda. Dengan diagram blok dan hasil plot
simulasi pada Gambar 3.20 dan Gambar 3.21. Data rinci keluaran arus
dan tegangan hasil simulasi tertera pada Gambar 3.22 dan Gambar 3.23.



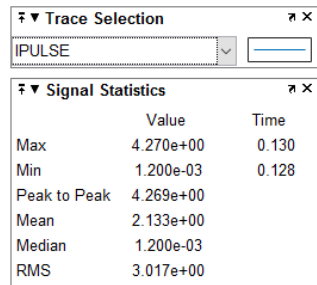
Gambar 3.20 Diagram blok simulasi penghasil sinyal pulsa



Gambar 3.21 Hasil *plotting* keluaran simulasi sinyal pulsa



Gambar 3.22 Data simulasi tegangan pulsa



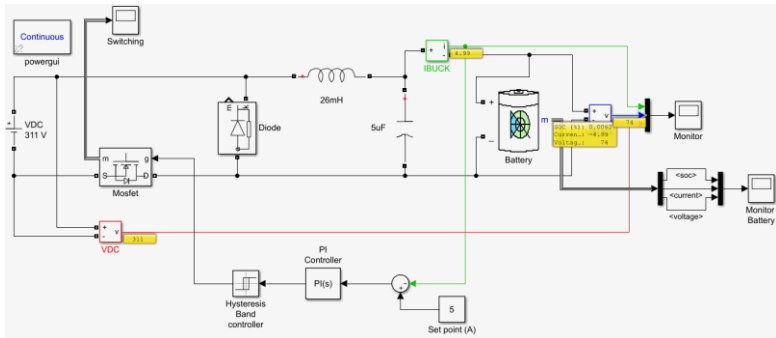
Gambar 3.23 Data simulasi arus pulsa

3.4.3 Simulasi *Constant Current (CC) Charging*

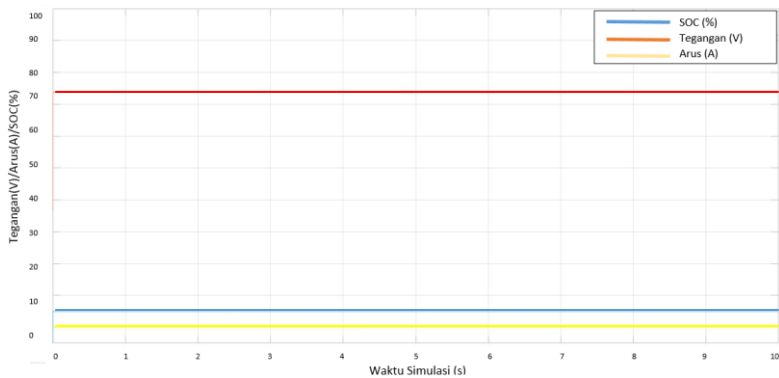
Simulasi menggunakan rangkaian *buck* yang sudah dihitung nilai parameter sesuai spesifikasi, dengan menambahkan sensor arus dan sensor tegangan. Nilai pembacaan sensor dikurangkan dengan nilai set poin yang ditentukan (nilai arus konstan yang diinginkan), kemudian hasil pengurangan tersebut diumpan balikkan menuju system melalui kontroler. Kontroler yang digunakan adalah jenis kontroler PI. Nilai dari parameter kontroler PI, yaitu K_p dan K_i didapatkan dengan metode *trial error*. Keluaran dari kontroler PI ini digunakan untuk men-trigger pin *gate* dari MOSFET.

Parameter simulasi ini adalah menggunakan baterai Li-ion untuk penggerak motor listrik berkapasitas 34Ah, dengan tegangan nominal 86.4 V (24 sel baterai). Arus konstan ditetapkan dijaga pada nilai 5 Ampere, dan mode *constant current* berlangsung selama SOC baterai dibawah 75%, dengan diagram blok simulasi seperti pada Gambar 3.24

dan hasil simulasi dengan plot parameter charging baterai pada Gambar 3.25.



Gambar 3.24 Diagram blok simulasi CC charger

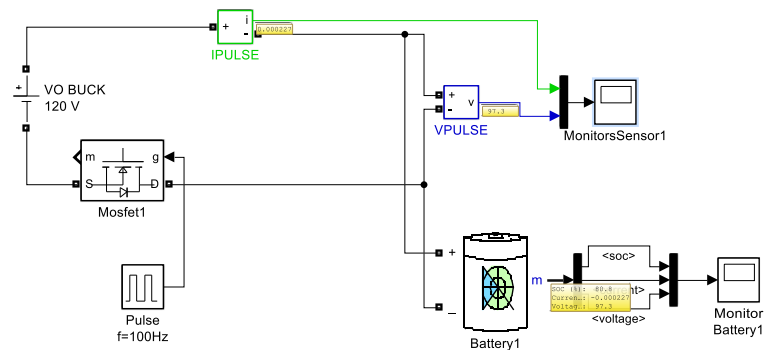


Gambar 3.25 Hasil simulasi CC charging

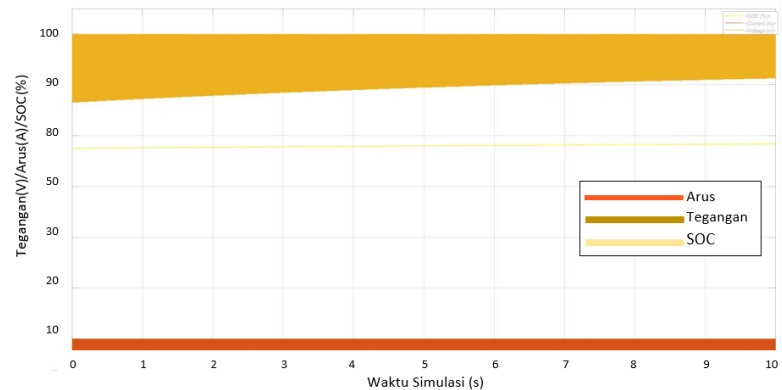
Simulasi dilakukan selama sepuluh detik, untuk melihat respons SOC dari baterai, dengan diterapkannya mode *constant current*. Didapatkan data hasil simulasi, SOC meningkat dari 0.00 menjadi 0.04%, tegangan baterai meningkat dari 73.8 Volt menjadi 74.1 Volt, dengan arus *charging* yang dikontrol menggunakan kontroler PI, didapatkan nilai maksimum 5,01 Ampere dan minimum 5 Ampere dengan nilai rms 4,98 Ampere.

3.4.4 Simulasi *Pulse Charging (PC)*

Simulasi dilakukan untuk melihat respons arus, tegangan, dan SOC baterai saat diterapkan pengisian berupa pulsa. Parameter simulasi ini adalah menggunakan baterai Li-ion untuk penggerak motor listrik berkapasitas 34Ah, dengan tegangan nominal 86.4 V (24 sel baterai). Masukan pulsa diterapkan dengan frekuensi 100 Hz dan 1 kHz, arus maksimum 5 Ampere dan minimum 0 Ampere, waktu simulasi sepuluh detik. Mode *pulse charging* dilakukan saat kondisi baterai melebihi atau samadengan 75%. Dengan diagram blok simulasi seperti pada Gambar 3.26, dan hasil simulasi pada Gambar 3.27.

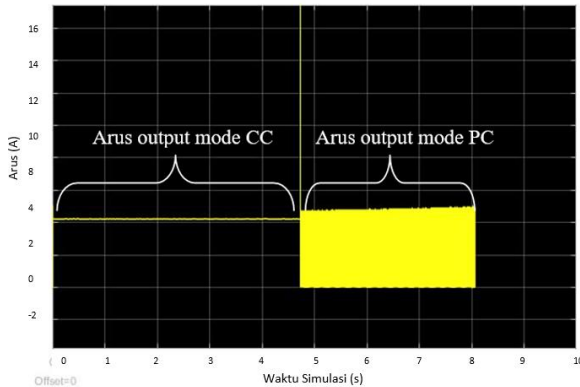


Gambar 3.26 Diagram blok simulasi PC charger



Gambar 3.27 Hasil simulasi PC

keluaran minimal 4.17 dan maksimum 4.23 Ampere, tegangan konstan (dikarenakan beban resistor) 118 Volt.

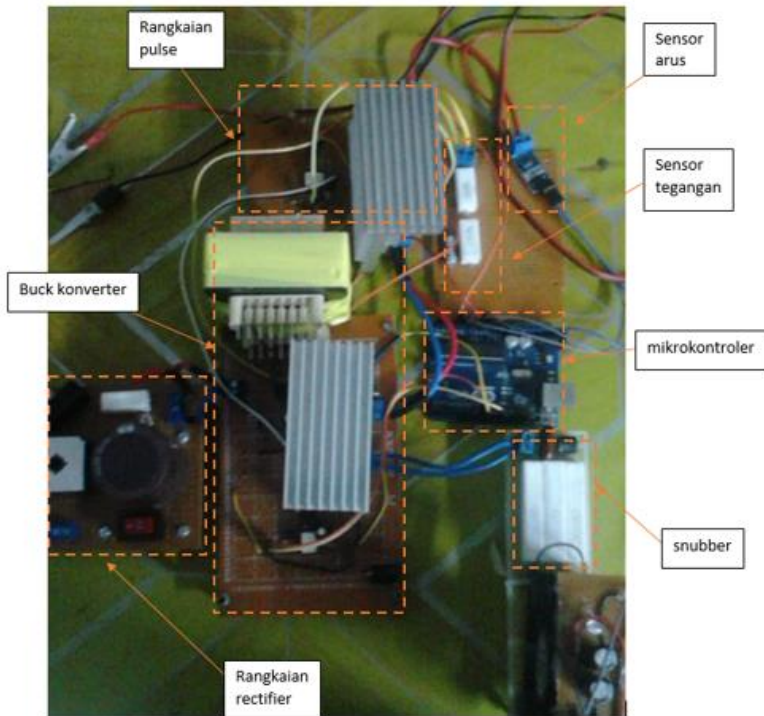


Gambar 3.29 *Plotting* simulasi perubahan mode *charging*

Pada saat nilai SOC diubah menjadi 80%, mekanisme *charging* berubah dari mode CC ke mode PC (*threshold* CC menuju PC adalah 75% [13]) seperti dilihat pada Gambar 3.29, dengan pengaturan arus pulsa bernilai rms dari Ipeak 4.2 Ampere dengan duty cycle 50% dan frekuensi pulsa sebesar 100 Hz.

3.5 Pengujian Implementasi Hasil Desain

Setelah dilakukan simulasi tiap perangkat, dilakukan realisasi hasil desain dari simulasi, dengan hasil realisasi seperti pada Gambar 3.30. Pengujian dari *charger* dilakukan pada tiap perangkat penyusun yang telah disimulasikan dan direalisasikan. Parameter pengujian meliputi pengujian *buck* konverter (akurasi penurunan tegangan dan performa efisiensi), pengujian rangkaian *pulse* (performa tegangan dan arus sinyal pulsa dengan frekuensi diatur), pengujian akurasi dari sensor arus dan tegangan, serta pengujian konverter *loop* tertutup yang parameter keluaran arus diatur nilainya agar konstan.



Gambar 3.30 Hasil perancangan *charger*

3.5.1 Pengujian *Buck Konverter*

Pengimplementasian *buck* konverter diuji dengan prosedur dan kondisi *buck* konverter dihubungkan dengan beban resistif murni sebesar $25\ \Omega$, dengan tegangan input bernilai *variable* yang didapatkan dari *power supply* PROTEK P3005-D, dan diukur tegangan keluarannya menggunakan multimeter SANWA. Nilai *duty cycle* dari *switching* MOSFET *buck konverter* diubah ubah untuk melihat linieritas keluaran *konverter*. Hasil pengukuran keluaran *konverter* dibandingkan dengan perhitungan.

Tabel 3.2 Data *buck* konverter dengan *duty cycle*=10%

Tegangan masukan (V)	Tegangan keluaran (terukur) (V)	Tegangan keluaran (hitungan) (V)
10	1,065	1
15	1,627	1,5
20	2,193	2
25	2,75	2,5

Tabel 3.3 Data *buck* konverter dengan *duty cycle*=20%

Tegangan masukan (V)	Tegangan keluaran (terukur) (V)	Tegangan keluaran (hitungan) (V)
10	2,03	2
15	3,1	3
20	4,2	4
25	5,28	5

Tabel 3.4 Data *buck* konverter dengan *duty cycle*=30%

Tegangan masukan (V)	Tegangan keluaran (terukur) (V)	Tegangan keluaran (hitungan) (V)
10	2,83	3
15	4,34	4,5
20	5,85	6
25	7,35	7,5

Tabel 3.5 Data *buck* konverter dengan *duty cycle*=38%

Tegangan masukan (V)	Tegangan keluaran (terukur) (V)	Tegangan keluaran (hitungan) (V)
10	3,66	3,8
15	5,99	5,7
20	7,53	7,6
25	9,44	9,5

Setelah pengujian *duty cycle*, dilakukan pengujian performa dari konverter. Dengan prosedur, memasang konverter dengan beban

resistif yang nilainya berubah ubah, sehingga didapatkan daya beban yang kecil (30 watt) hingga daya beban rating (500 watt), diukur tegangan input output konverter menggunakan multimeter SANWA ,dan diukur arus input output konverter menggunakan clampmeter SANWA sehingga dapat dilihat efisiensi dari konverter tersebut, dengan data pada Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Data pengujian performa *buck* konverter

Vin (V)	I in (A)	Vout (V)	I out (A)	P in (W)	P out (W)	Efisiensi (%)
306	0,15	133	0,23	45,9	30,59	66,64
306	0,27	133	0,35	82,62	46,55	56,34
306	0,57	133	0,93	174,42	123,69	70,91
306	0,98	133	1,5	299,88	199,5	66,52
306	1,2	133	1,7	367,2	226,1	61,57
306	1,5	133	1,9	459	252,7	55,05
306	2,32	133	2,66	709,92	353,78	49,83
306	2,55	133	2,95	780,3	393,0889	50,37
306	2,7	133	3,32	826,2	442,225	53,52
306	2,9	133	3,59	887,4	478,0811	53,87
306	3,2	133	4,3	979,2	571,9	58,40
306	3,7	132	4,6	1132,2	607,2	53,63

3.5.2 Pengujian Rangkaian Pulse

Rangkaian pulse dilihat gelombang hasil *switching* dengan frekuensi yang ditentukan. Rangkaian pulse dihubungkan dengan beban resistif murni sebesar 25 Ω , diberikan tegangan *input variable* yang didapatkan dari *power supply* PROTEK P3005-D. Diterapkan nilai frekuensi sinyal pulsa dengan nilai 100 Hz dan 1 kHz [14] yang diukur keluaran tegangannya menggunakan multimeter SANWA dan melihat sinyal keluaran rangkaian menggunakan osiloskop TEKTRONIK.

Tabel 3.7 Data gelombang pulsa, $f=100$ Hz, duty cycle 50%

Vin	Vout (v)	Vout (hitungan) (V)
5	4,59	3,535533906
10	9,53	7,071067812
15	14,49	10,60660172
20	19,5	14,14213562
25	24,4	17,67766953



Gambar 3.31 Gelombang gate dengan frekuensi 100 Hz



Gambar 3.32 Gelombang keluaran rangkaian pulsa $f=100$ Hz

Tabel 3.8 Data gelombang pulsa, frekuensi 1 kHz, *duty cycle* 50%

Vin	Vout (v)	Vout (hitungan) (v)
5	4,65	3,535533906
10	9,5	7,071067812
15	14,5	10,60660172
20	19,5	14,14213562
25	24,4	17,67766953



Gambar 3.33 Gelombang keluaran rangkaian pulsa $f=1$ kHz

3.5.3 Pengujian Sensor Tegangan

Sensor tegangan hasil perancangan diuji, dengan prosedur menghubungkan sensor dengan terminal power supply. Power supply yang digunakan adalah PROTEK P3005-D, membandingkan tegangan keluaran power supply (nilainya diubah-ubah) yang tertera pada monitor power supply dengan pembacaan sensor yang ditampilkan melalui *serial monitor* mikrokontroler Arduino, kemudian dibandingkan hasil pembacaan tersebut dengan *display* pada power supply.

Dilakukan kalibrasi desain sensor, dengan acuan tegangan pembacaan dari power supply PROTEK P3005-D yang bertujuan untuk mengkoreksi akurasi sensor tegangan. Prosedur kalibrasi yaitu mencatat nilai ADC (Analog Digital Konverter) terbaca oleh sensor dan mencatat nilai tegangan power supply yang terhubung dengan sensor. Kedua data tercatat tersebut, dilakukan regresi linier untuk mendapatkan persamaan garis diantaranya (menggunakan bantuan *software* pengolah angka,

Microsoft Excel) dengan nilai tegangan sebagai sumbu x dan nilai ADC sensor sebagai sumbu y. Setelah didapatkan persamaan garis, nilai ADC terbaca oleh sensor disubstitusikan, dihasilkan nilai tegangan terbaca oleh sensor.

Tabel 3.9 Data pembacaan sensor tegangan

Vin (Oleh power suplai) (Volt)	V (tanpa kalibrasi) (Volt)	V (dengan kalibrasi) (Volt)
0	0	0,231
5	4,6	4,9
10	9,4	9,9
15	14,4	15
20	19,2	20
25	24,2	25
30	29,1	30,1
35	34	35,1
40	38,8	40,1
45	43,8	45,2
50	48,7	50,2
55	53,6	55,2
60	58,5	60,3

3.5.4 Pengujian Sensor Arus

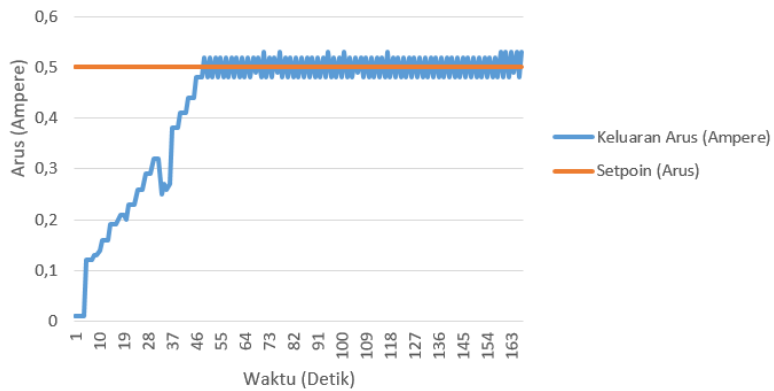
Dilakukan pengujian sensor arus ACS 712, dengan prosedur pengujian merangkai seri sensor arus pada objek pengukuran, yaitu satu buah rangkaian listrik dengan sumber tegangan dari power supply PROTEK P3005-D yang dihubungkan dengan beban resistif 10Ω. Diamati arus yang mengalir dari sumber tegangan menuju beban resisitif menggunakan sensor dan monitor arus dari power supply. Sama dengan sensor tegangan sebelumnya, sensor arus ACS 712 diterapkan proses kalibrasi untuk mengkoreksi akurasi pembacaan.

Tabel 3.10 Data pembacaan sensor arus

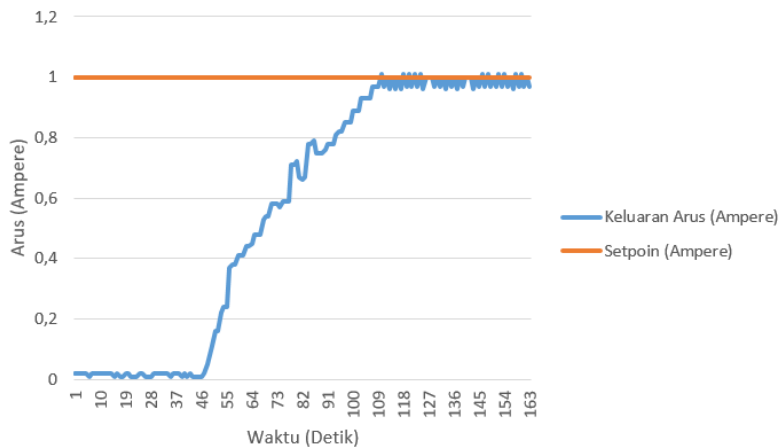
Arus (oleh power suplai) (Ampere)	Arus terbaca oleh sensor (Ampere)
0	0,07
0,25	0,29
0,5	0,59
0,75	0,81
1	1,1
1,25	1,24
1,5	1,46
1,75	1,76
2	2,05
2,25	2,27
2,5	2,49
2,75	2,71
3	3

3.5.5 Pengujian Loop Tertutup-Kontrol Arus Konstan

Sebelum dilakukan *charging* pada baterai yang sesungguhnya, dilakukan percobaan untuk melihat kemampuan charger dalam menghasilkan keluaran berupa arus konstan secara *close loop*. Metode pengaturan arus konstan yang digunakan yaitu kontrol PI, dengan nilai parameter Kp dan Ki didapatkan dari *trial and error* yaitu 30 dan 0,022. Prosedur pengujian pengaturan arus konstan, pertama menghubungkan *buck* konverter dengan sensor arus dan beban resistif 10Ω secara seri, yang nilai pembacaan sensor arus diumpan balikkan menuju pin analog input mikrokontroler. Dilakukan pengujian arus konstan dengan keluaran diatur (setpoint) pada nilai 0.5 dan 1 Ampere, dan hasil keluaran kontroler PI dapat dilihat pada Gambar 3.34 dan Gambar 3.35.



Gambar 3.34 Hasil kontrol terhadap setpoin 0,5 Ampere



Gambar 3.35 Hasil kontrol terhadap setpoin 1 Ampere

BAB IV

IMPLEMENTASI DAN ANALISIS DATA

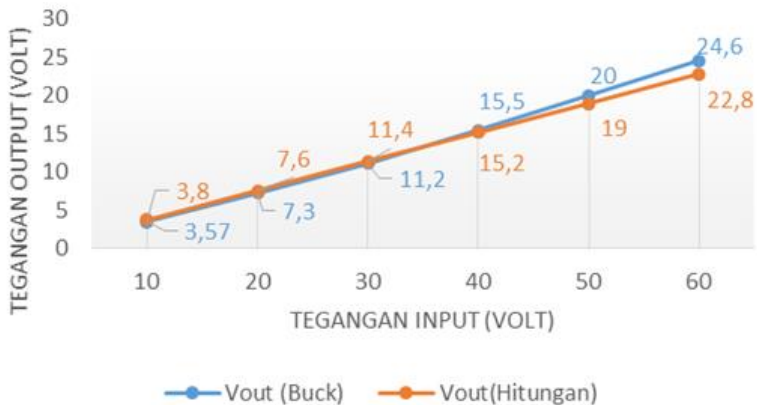
4.1 Prosedur Pengujian

Pengujian *buck* konverter, dilakukan pengujian akurasi penurunan tegangan dan perfroma (efisiensi). Peralatan yang diperlukan untuk pengujian akurasi yaitu sumber dc untuk konverter dan diukur keluarannya dengan multimeter. Sedangkan untuk pengujian performa, peralatan yang digunakan yaitu sumber dc untuk suplai dari konverter, multimeter untuk mengukur tegangan masukan keluaran konverter, dan clampmeter untuk mengukur arus masukan keluaran, sehingga dapat dihitung efisiensi konverter. Sedangkan untuk pengujian *charging* baterai digunakan peralatan ukur multimeter untuk mengukur tegangan dari baterai dan konverter, serta sarana serial monitor dari mikrokontroler untuk melihat nilai arus yang mengalir dari charger menuju baterai melalui sensor arus.

4.2 Analisis Hasil Pengujian

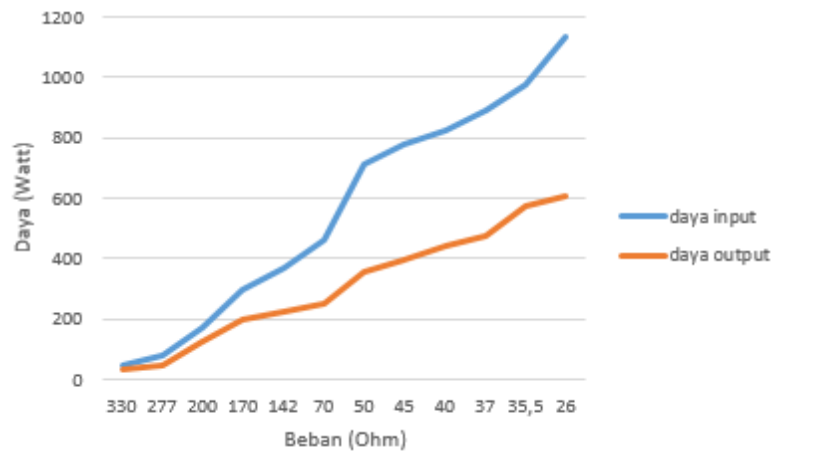
4.2.1 Analisis Pengujian Performa Konverter

Grafik perbandingan+analisis hitungan dengan data percobaan:

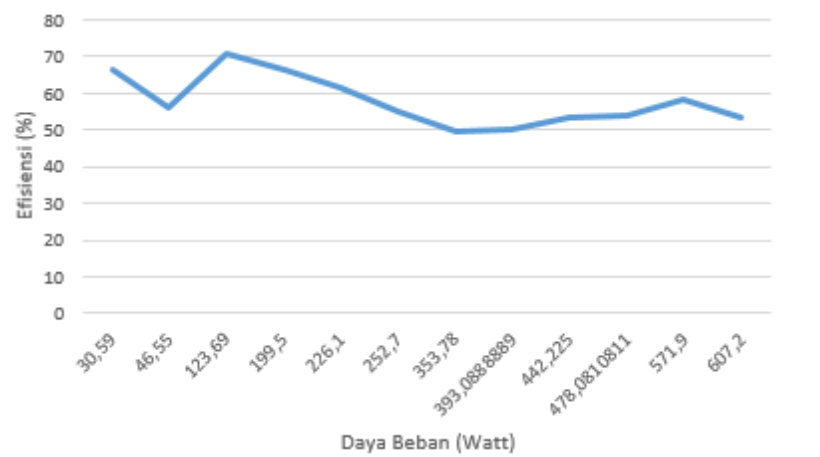


Gambar 4.1 Perbandingan tegangan input terhitung dengan terukur

Akurasi hasil keluaran tegangan konverter dibandingkan dengan keluaran tegangan melalui hasil perhitungan, didapatkan kesalahan rata rata sebesar 4,43 %, dengan nilai kesalahan tertinggi 7% dan kesalahan terendah 1,7%. Adanya kesalahan ini disebabkan oleh tegangan jatuh pada komponen penyusun konverter seperti dioda.

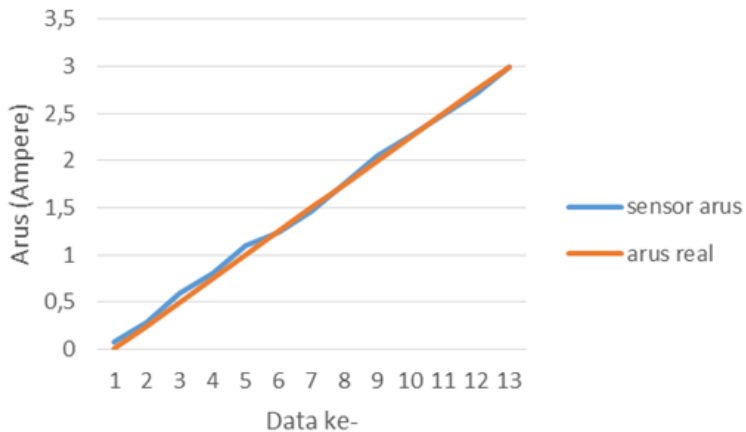


Gambar 4.2 Perbandingan grafik daya input terhadap daya output

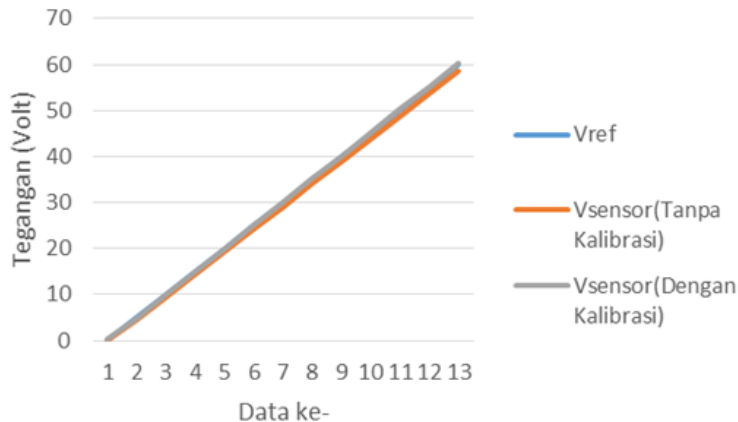


Gambar 4.3 Tren efisiensi terhadap daya beban

Faktor terbesar yang memengaruhi efisiensi, adalah rugi rugi dari nilai resistansi dalam (*internal resistance*) rangkaian konverter. Resistansi dalam tersebut terdapat pada komponen induktor berupa X_L , dan kapasitor berupa X_C dimana nilai reaktansi (X) tersebut dipengaruhi oleh nilai frekuensi. Frekuensi disini yaitu, frekuensi yang digunakan dalam *switching*. Semakin besar frekuensinya, maka nilai reaktansi X_L semakin besar, dan nilai reaktansi X_C semakin kecil. Selain itu terdapat resistansi internal seperti pada mosfet, yang dapat dilihat pada datasheet dimana nilai resistansinya bergantung pada kondisi tertentu. Berdasarkan *datasheet* untuk komponen mosfet IRFP 460, memiliki resistansi pada *junction drain-source* sebesar 0.27Ω disaat tegangan gate bernilai 10 Volt dan arus yang mengalir dari drain-source bernilai 12 Ampere. Untuk meningkatkan efisiensi, dapat dilakukan parallel inductor *buck* konverter (membagi nilai reaktansi induktif) dan memilih mosfet dengan nilai resistansi *junction* yang cukup kecil. Untuk beban resistif sebagai pengujian, semakin kecil beban maka semakin besar beban tersebut itu menarik arus dari sumber. Dengan arus yang semakin besar, maka rugi rugi arus juga menjadi semakin besar yang menyebabkan efisiensi dari konverter turun.



Gambar 4.4 Pembacaan sensor arus



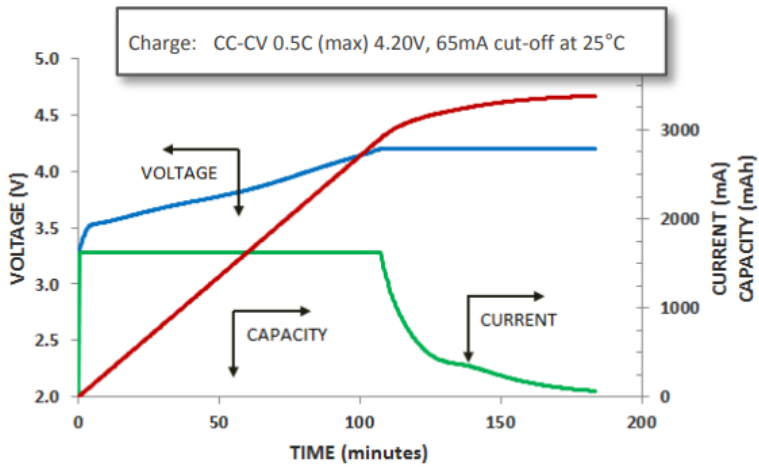
Gambar 4.5 Pembacaan sensor tegangan

Untuk sensor arus dan tegangan, memiliki nilai kesalahan rata rata masing masing sebesar 4,57% dan 0,48%. Ketidakakurasian masih dalam batas toleransi dimana bernilai dibawah 5%. Nilai kesalahan memengaruhi aksi kontrol dari kontroler yaitu memengaruhi nilai PWM.

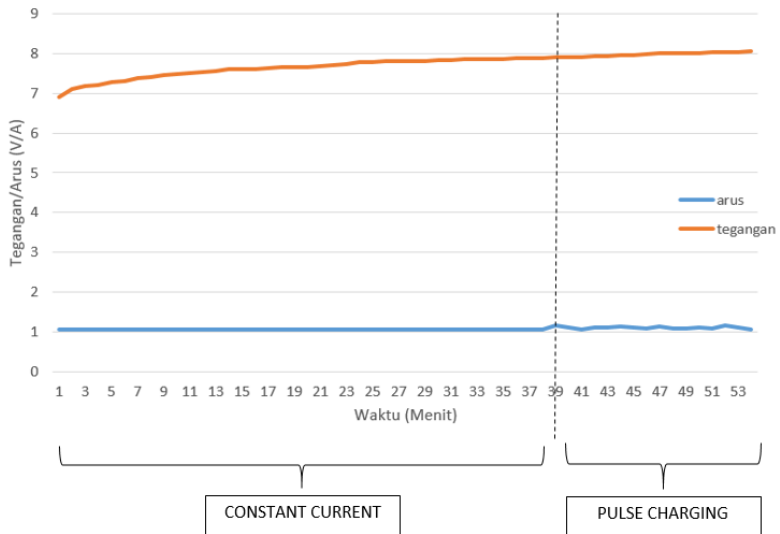
4.2.2 Analisis Pengujian *Charging* CCPC

Baterai yang digunakan untuk pengujian *charger prototype* ini adalah baterai multisel (dua buah sel baterai dirangkai seri) Panasonic tipe NCR18650B, dengan karakteristik *charging* seperti pada Gambar 4.6. *Charging* dilakukan dengan mode CC dengan arus diatur konstan 1 Ampere, mode PC dengan frekuensi pengujian 100 Hz dan 1 kHz [14]. Menurut data sheet IC LTC4052, mode CC diaplikasikan pada baterai saat tegangan baterai berada ditegangan nominal baterai, dan mode PC diaplikasikan pada saat tegangan baterai saat mendekati rating baterai.

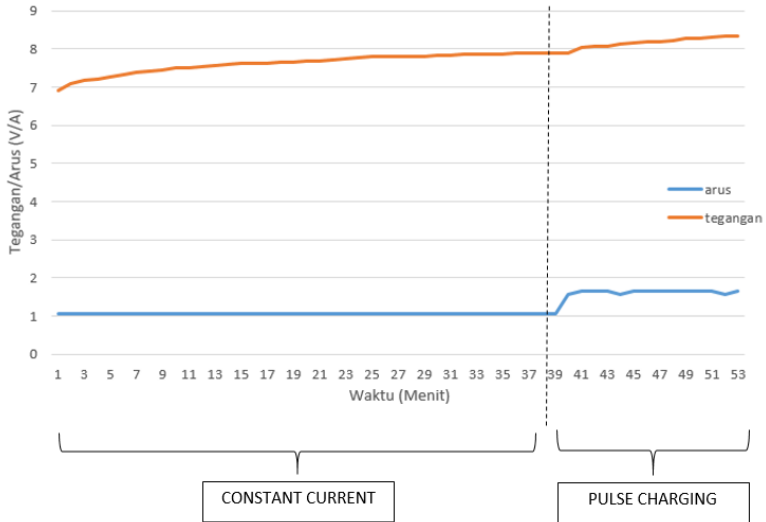
Charge Characteristics



Gambar 4.6 Karakteristik *charging* baterai Panasonic NCR18650B

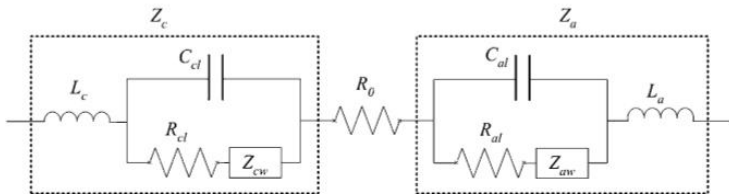


Gambar 4.7 Kurva karakteristik *charging* CCPC dengan $f=100$ Hz



Gambar 4.8 Kurva karakteristik *charging* CCPC dengan $f=1$ kHz

Frekuensi berpengaruh pada efisiensi dan durasi *charging* baterai [14]. Menurut Liang-Rui Chen, baterai dimodelkan memiliki impedansi (Z) merupakan total reaktansi dari anoda (Z_a) dan katoda (Z_c) yang masing masing terdiri dari induktansi (L), kapasitansi (C), dan resistansi (R) baterai seperti pada Gambar 4.9. Dengan nilai Z yang minim, maka arus *charging* menuju baterai menjadi lebih optimal (rugi rugi karena Z menjadi kecil). *Charging* pulsa dengan frekuensi diterapkan untuk meminimalisir nilai Z dan mengoptimalkan efisiensi transfer energi dari *charger* menuju baterai. Pengaplikasian pulsa dengan frekuensi tertentu diterapkan agar ditemukan arus *charging* maksimum, sehingga *charging* menjadi lebih optimal.



Gambar 4.9 Pemodelan impedansi baterai

Charging dengan mode CC menunjukkan bahwa tegangan baterai meningkat berbanding lurus terhadap waktu. Disaat masuk mode PC, waktu *charging* pada frekuensi 1 kHz didapati tiga kali lebih cepat daripada frekuensi 100 Hz, dapat dilihat pada Gambar 4.7 dan Gambar 4.8. Dimana, pada menit ke-53, baterai dengan frekuensi *charging* 1 Khz mencapai level tegangan 8,33 Volt, lebih tinggi dari baterai dengan frekuensi *charging* 100 Hz (8,03 Volt). Didapatkan juga, arus *charging* saat mode PC dengan frekuensi 1 kHz lebih besar daripada 100 Hz, yaitu rata rata 1,65 Ampere yang mana arus *charging* ini masih aman pada baterai 1,67 Ampere($0,5 \times \text{Kapasitas}$; Kapasitas=3350 Ah). Jadi, frekuensi 1 kHz lebih meminimalisir nilai impedansi (Z) dari baterai, dibandingkan dengan frekuensi 100 Hz dan terbukti bahwa frekuensi menurunkan waktu pengisian baterai, dan arus *charging* menjadi lebih optimal[14].

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

BAB V

PENUTUP

Penggunaan *buck* konverter sebagai *charger* baterai Li-ion dengan keluaran terkontrol memiliki efisiensi rata rata 55%. *Charging* baterai Li-ion multisel dengan menggunakan mode CC berhasil mengisi baterai, dengan naiknya level tegangan baterai berbanding lurus terhadap waktu *charging*. Efektifitas mode PC, bergantung terhadap ketepatan frekuensi yang digunakan untuk *charging* baterai. Pada baterai Li-ion Panasonic tipe NCR18650B, frekuensi PC 1 kHz lebih optimal dibandingkan dengan 100 Hz. Frekuensi PC terbukti memengaruhi durasi *charging* baterai. Serta didapatkannya *charger* aman bagi baterai (*charging* dengan tegangan nominal hingga rating baterai).

Saran untuk penelitian terkait dengan penggunaan *buck* konverter dengan keluaran terkontrol CCPC sebagai *charger* baterai Li-ion adalah, peningkatan frekuensi *switching* konverter, agar dapat meminimalisir ukuran dari inductor dan kapasitor. Penggunaan kecerdasan buatan sebagai control keluaran konverter, dan metode pendeteksi frekuensi pulsa optimal. Untuk pengaplikasian pada baterai seri dalam ukuran yang besar, sangat direkomendasikan *charger* dikombinasikan dengan sel *balancer* baterai.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Said, "Outlook Energi Indonesia 2014," D. E. N. R. Indonesia, Ed., ed, 2014.
- [2] X. W. B. Zhu, "The Research of Vehicle Power Li-ion Battery Pack Balancing Method," presented at the The Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments, Shanghai, Cao'an road 4800, China, 2009.
- [3] F. Savoye, P. Venet, M. Millet, and J. Groot, *Impact of Periodic Current Pulses on Li-Ion Battery Performance* vol. 59, 2012.
- [4] D. Deng, "Li-ion batteries: basics, progress, and challenges," Department of Chemical Engineering and Materials Science, Wayne State University, Detroit, Michigan 482022015.
- [5] X. W. S. Hu, R. Wang, J. Wu and X. He, "Hybrid sinusoidal-pulse charging strategy for Li-ion battery in electric vehicle application," presented at the 015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Charlotte, 2015.
- [6] Y. P. Richard C.Cope, "The Art of Battery Charging," 1999.
- [7] S. M. I. N. a. S. Sirisukprasert, "Adaptive pulse charger for Li-ion batteries," presented at the 017 8th International Conference of Information and Communication Technology for Embedded Systems (IC-ICTES), Chonburi, 2017.
- [8] N. Majid, S. Hafiz, S. Arianto, R. Y. Yuono, E. T. Astuti, and B. Prihandoko, "Analysis of effective pulse current charging method for lithium ion battery," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 817, p. 012008, 2017.
- [9] D. L. a. J. T. Yong Tian, "A Comparative Study of State-of-Charge Estimation Algorithms for Lithium-ion Batteries in Wireless Charging Electric Vehicles," Graduate School, College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, P.R. China, 2016.
- [10] W. I. H. Ibrahim Alhamrouni, Mohamed Salem, Fadi M. Albatsh, Member, IEEE, and Bazilah Ismail, "Application of DC-DC konverter for E.V battery charger using PWM

- technique and hybrid resonant," Electrical Engineering Department International College, Universiti Kuala Lumpur, Kuala Lumpur, 2016.
- [11] D. S. P. Augusti Lindiya, Iyyappan, "Performance Comparison of Various Controllers for DC-DC Synchronous *Buck* Konverter," presented at the Procedia Engineering, 2012.
 - [12] B. Hauke, "Basic Calculation of a *Buck* Konverter's Power Stage," Texas Instruments 2015.
 - [13] LINEAR TECHNOLOGY, LTC405-4.2, "Lithium-Ion Battery Pulse Charger with Overcurrent Protection"
 - [14] L.-R. Chen, "A Design of an Optimal Battery Pulse Charge System by Frequency-Varied Technique," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, vol. 54, 2007.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Nama : Zatriananda Dibya P.
TTL : Surabaya, 12 Mei 1996
Jenis Kelamin : Laki laki
Agama : Islam
Alamat : Jl. Gundih II no.9 Suraba
ya
Telp : 031-5312416
Email : zatdibya@gmail.com

RIWAYAT PENDIDIKAN

2001-2007 : SDN TEMBOK DUKUH I SURABAYA
2007-2010 : SMPN 21 SURABAYA
2010-2013 : SMA TRIMURTI SURABAYA
2013-2016 : D3 TEKNIK ELEKTRO ITS SURABAYA
2016-2018 : S1 TEKNIK ELEKTRO ITS SURABAYA

PENGALAMAN KERJA

2013 : Kerja praktek di PT TELKOM div. maintenance kalibrasi Surabaya
2017 : Kerja praktek di PT PLN, Area Pelaksana Pemeliharaan Surabaya

